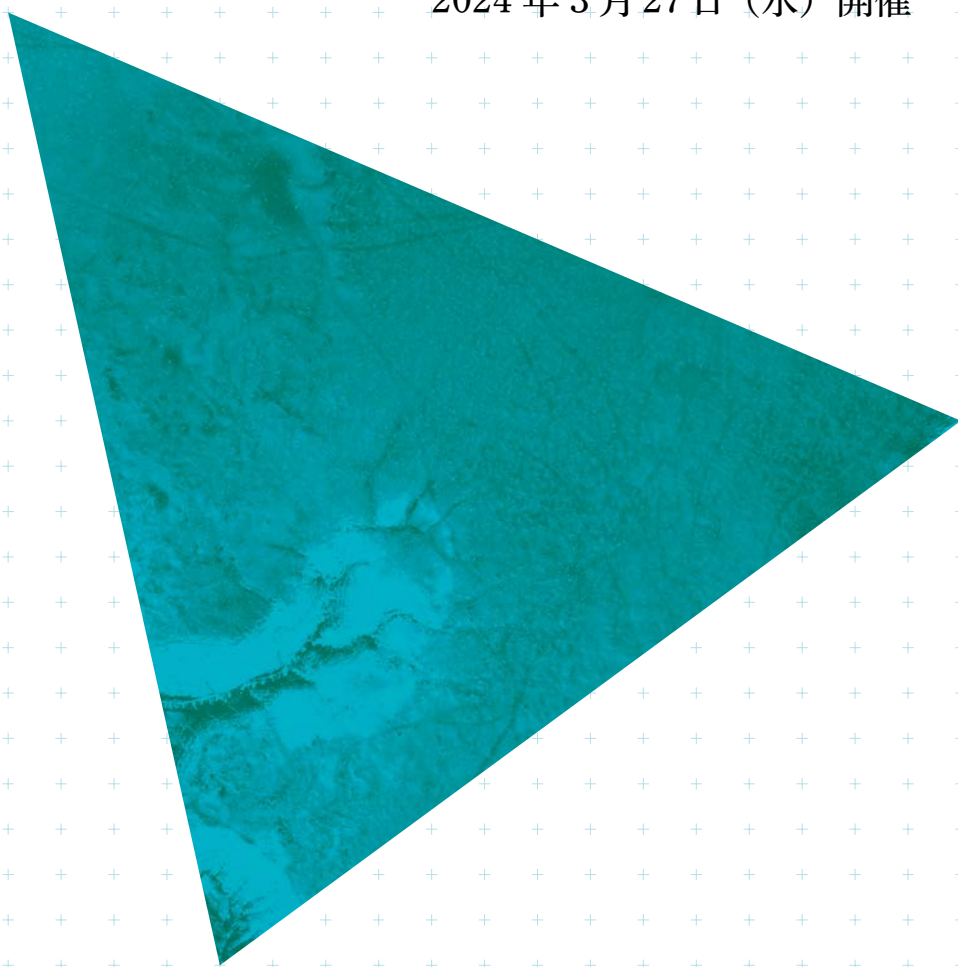


俯瞰ワークショップ報告書

環境・エネルギー分野における ナノテク・材料の可能性 —水の利用—

2024年3月27日（水）開催



エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が令和6年3月27日（水）に開催した「俯瞰ワークショップ 環境・エネルギー分野におけるナノテク・材料の可能性—水の利用—」に関するものである。

太陽電池材料や蓄電デバイス、エネルギーキャリア、分離技術の開発に見られるように、ナノテクノロジー・材料分野の科学技術の進展は環境・エネルギー分野の課題解決に対して重要な役割を果たし得る。ナノテクノロジー・材料分野からの貢献の可能性を横断的に俯瞰することで、環境・エネルギー分野の今後の研究開発の方向性に対する新たな視点やヒントを得ることが期待できる。そこでCRDSでは、新しい潮流や今後の研究開発の方向性について分野の枠を超えて議論を行うための検討を行った。題材としては昨今改めて注目されている「水」を取り上げた。

水は人間社会の生存基盤としてあらゆる側面に関わる。国連の報告によれば、安全に管理された飲料水へのアクセスは年々改善されつつあるものの、未だ世界の約4分の1にあたる22億人が利用できていない。先進国においても飲料水中の有機フッ素化合物（PFAS）など様々な化学物質に関する問題が存在する。また水処理プロセスには多くのエネルギーが必要になるため、カーボンニュートラルの実現に向けたグリーン化が課題になっている。水電解による水素の製造にも、今後、原料としての水が世界的に必要なと考えられている。加えて近年は気候変動の影響によって10年に一度と言われるような極端な大雨や高温が頻度、強度ともに増加傾向にある。これらによる深刻な風水害や干ばつが世界的に懸念されており、各地での水の確保や利用の様相はこれから大きく変わっていく可能性がある。

このように水利用の持続可能性には未だ多数の課題が存在している。またこうした課題の解決に向けた取り組みとナノテクノロジー・材料分野との接点は必ずしも十分には明らかになっていない。そこで本ワークショップ（WS）では、水そのものや水の機能性をナノテクノロジー・材料の視点から深く理解し、より良く制御・利活用することが、上記のような社会課題の解決にどう貢献し得るかを俯瞰することを目的に議論を行った。

本WSは基調講演と4つのセッションで構成されている。以下に基調講演および各セッションにおける主な話題をまとめる。

基調講演

水の利用に関する問題はナノスケールから地球規模まで幅広いスケールを包含する。なかでも水質汚染・水処理ではナノ～マイクロスケールの汚染物質が問題となり、ナノテクノロジー・材料の活用が期待される。多様な研究が進められてきているが、共通的な課題はミクロなスケールの現象の理解や制御をいかにスケールアップして実用化に繋げるかである。

最近の話題として親水性で難分解の低分子の汚染物質の処理がある。従来法である逆浸透膜による除去では限界があり、ナノ複合膜による研究開発が進められている。

セッション1「はかる」

水の安定同位体の構成比の時空間的な変化・変動を追跡することで全球規模の水循環のシミュレーションを高度化させることができる。近年は衛星観測データから水蒸気同位体比を測ることが可能になってきており、それらを活用したデータ同化によって気象予測の精度向上も明らかになりつつある。

現在の水質汚染物質の監視体制では限られた対象物質に対する高精度な分析や管理が行われている。一方で河川流域など環境中の水には多様な化合物が含まれる。それらを効率的に把握するために精密質量分析

計を用いた網羅的なスクリーニング手法の開発が進められている。

水の存在下において環境と調和・相互作用しながら機能を発揮する材料、「水圏機能材料」の開発を目指す取組みが進められている。その一環で、イオン液晶分子の自己組織化により形成された水浄化膜内部での水分子の状態解析を分子動力学シミュレーションを用いて行った結果、水分子が異なる4種類の状態で存在していることが明らかにされた。

水の動的な濡れ性は世界的には研究が非常に活発に行われているテーマであり、マルチスケール性のある現象であり、流体力学や表面化学、ナノ構造材料など多様な観点、分野が関係する。応用面では水ハーベスティング、熱交換器、空調、除霜、セルフクリーニング、コーティングなど多岐に亘り、多様な制御技術開発が行われている。

セッション2「わかる」

フラックス法に基づく独自の結晶成長技術を陽イオン、陰イオン交換性の水処理材料の開発に活かした事例では、国内で浄水器として商用化され、また現在、アフリカにおいて、高濃度の重金属イオンやフッ化物イオンを含んでいるため安全な水の確保に問題を抱える地域での実証試験が進められている。開発材料の国際認証取得についても検討が進められている。

コロイドはナノオーダーの粒子が分散した状態にある、表面に電荷をもった機能性の物質である。環境中のコロイド粒子の凝集状態が水質に大きく関係し、凝集挙動を明らかにするため、ナノ粒子を用いた体系的な研究が長年行われてきた。またその間、環境汚染に関わる界面現象やその科学についての国際会議も開催され、界面科学との境界領域としてコロイド界面科学の展開可能性も示された。

核融合に必要な三重水素（トリチウム）は、リチウムに中性子を作用させて得る。核融合研究開発からの技術展開の一環として、イオン伝導体であるセラミックスの膜を利用したリチウム回収装置の社会実装の試みが進められている。現状では濃度の問題から海水からのリチウム回収は難しいが、先行的にリチウムイオン電池リサイクルや塩湖かん水からの回収への適用が進められている。

セッション3「つかう」

カーボンニュートラル社会の実現に向けて水電解の研究開発が活発に進められている。水電解の種類によって求められる水の電気伝導度が異なり、純水レベルの水を必要とするPEM水電解から伝導率の高いアルカリ水電解まで幅がある。今後は水電解の普及に伴いこれらの水の確保や管理も課題の1つとなる。また液体の水からの気体（水素、酸素）の生成はエントロピー変化（吸熱）を伴うため熱エネルギーのマネジメント技術も重要となる。

ウルトラファインバブル（UFB）と呼ばれるおおむね100ナノメートルの泡は水中で浮上も溶解もせず長期間滞留し、界面吸着、ガス貯蔵、ガス放出など様々な性質を持ち多様な応用可能性を有する。近年の研究により、スチーム（気体の水）・ガス混合蒸気の急速凝縮（液化）によるUFB生成手法や、緩慢界面前進凍結によるUFB濃縮技術が開発されている。

沸騰・蒸発を利用した冷却（沸騰冷却）は蒸発潜熱を利用するため小温度差で多量の熱移動が可能であり、空気空冷の約1000倍の熱交換が可能である。熱交換器にはその原理が使われており、今後は半導体など発熱する素子の冷却への利用が期待されている。沸騰冷却の性能向上のため限界熱流束と熱伝達率の向上に向けた研究開発が進められている。前者に関する現在のトレンドは毛細管現象の利用である。ハニカムポーラス体を用いることで気液の循環を促進する効果が期待されている。沸騰における気泡の移動は、水電解における電極表面の生成ガスの速やかな移動とも共通の課題であり、アナロジーを活かした研究開発も行われている。

セッション4 総合討論

本WSでは水そのものを使う（管理する）ことを考える従来の水利用に加え、水の機能性（例えば溶解、

反応場、相変化挙動、物質との相互作用、クラスター構造形成等）を使う（活用する）視点も含めることで、水の利用を従来よりも広い視点で捉えることを試みた。この観点から、総合討論では、分野を超えた共通的な視点や課題の有無、将来的な分野連携の可能性、予想される困難の有無などについて俯瞰的・横断的な議論を行った。議論の中からポイントと思われるいくつかの点を以下にまとめる。

- 本日の沸騰冷却、水電解、ウルトラファインバブル、動的濡れ性、コロイド等の話題は水と材料が相互作用する中での泡の制御あるいは界面領域の制御を扱うテーマであり、分野を超えた連携により更なる科学技術上の深化や発展が期待できる
- ナノから連続体までの異なるスケールを有機的に繋げる研究の推進が必要
- 日本は第一原理計算は活発だが、マルチスケールシミュレーションや大きいサイズや長時間のシミュレーションに関する研究は欧米と比して少なく、どのように強化していくかを考えるべき
- 実験との連携によるメゾスコピック分子シミュレーションを強化すべき
- 分野連携の場の設計や人材育成、コミュニティ作りには過去の経験も踏まえた工夫が必要
- 実社会の水利用の問題にナノテクノロジー・材料の観点から貢献していくためには適用分野や事例を少しずつでも探索・開拓していくことが必要
- 実験室のようなよく制御された環境・条件下で創られた理論や技術を実社会の多様な環境・条件でも通用可能なものにしていくことが重要
- 工業的な水利用の持続可能性は今後の課題として重要な視点の1つである
- コストに加えてエネルギー収支（温室効果ガス排出）などの環境負荷に関する評価軸も今後はより重要になる
- 非常時の水利用という視点も今後重要になる

以上、本WSでの話題提供や議論の内容は本書においてとりまとめる他、国として重点的に推進すべき研究開発課題群やその推進方策に関する提言の作成検討等、CRDSの各種活動に活用していく予定である。

目次

1	趣旨説明	1
2	基調講演	3
	水利用分野におけるナノテク・材料の利用可能性	3
3	セッション 1：はかる	15
3.1	水の同位体の利用	15
3.2	水環境における未規制有機汚染物質のスクリーニング分析	21
3.3	水圏機能材料の分子モデリング	29
3.4	水の動的濡れ現象の科学と工学	33
3.5	セッション討議	37
4	セッション 2：わかる	40
4.1	フラックス法による水処理材料の開発と応用	40
4.2	環境中のコロイドの理解・分離技術開発	45
4.3	純粋科学研究としての PFAS 問題とその解決方法 — PFAS 対策技術コンソーシアムからの提言	51
4.4	革新的な超高純度リチウム直接回収技術の社会実装	52
4.5	セッション討議	57
5	セッション 3：つかう	59
5.1	水電解装置と欧州プロジェクトのご紹介	59
5.2	水中からのウルトラファインバブル生成と ウルトラファインバブル水の凍結	64
5.3	沸騰冷却技術の最新動向と未来展望	69
5.4	セッション討議	74
6	セッション 4：総合討論	77
	付録	85
	付録 1 開催趣旨・プログラム	85
	付録 2 参加者一覧	87

1 | 趣旨説明

中村亮二 (JST-CRDS)

1
趣旨説明

今回のワークショップ（WS）は科学技術分野の俯瞰という位置付けにある。この分野においてこういった研究開発動向があるのか、最先端の動向はどういったものがあるのかといったことを把握していきたい。ワークショップの結果を踏まえて、今後さらに深掘り検討していく切り口がありそうか等を探していきたい。

なぜ今回水に着目したか。水は人間社会の生存基盤であり、かつ他のさまざまな必須の社会基盤と関連している。水・エネルギー・食料のNexus（ネクサス）という相互連関の考え方もある。水を起点に社会的な課題を見渡していくと、色々なものが繋がっていくので鍵となるターゲットではないかと考えられる。

これまで科学技術の進展は水の社会課題解決に大きく貢献してきた。最近、2023年にNature Waterが創刊されたが、これは、水に係る現在の社会課題を背景に、今後も科学技術への期待が高いことを示唆するトピックスである。

水の利用に関する社会課題としてまず挙げられるのは安全・安心である。水処理、水環境の把握やリスク評価・管理が含まれる。人間が利用できる淡水は場所によっては量的に限られるので循環利用も非常に重要となる。昨今、こういったものに大きく影響を及ぼしているのが気候変動である。グローバルな水の循環のパターンが大きく変化しつつある中において、もはや気候変動の影響を無視することはできない。また気候変動の緩和、カーボンニュートラルの達成とも関連する。先ほどNexusという話をしたが、水利用や水処理プロセスに係るエネルギーの削減、グリーン化が求められる一方で、エネルギーの生産や消費に必要な水の利用の効率化も課題と言える。自然共生の観点では、最近ではネイチャー・ベースド・ソリューションズやネイチャー・ポジティブ等が大きく関わってくるところかと思われる。これらの課題に科学技術がどう貢献できるかというのは今回のWSの背景にある関心事である。

研究開発としての今後の方向性はどうか、Nature Waterの創刊号で有識者ら9名の展望が取り上げられている記事があった。気候変動の問題から人権の問題まで非常に幅広いが、ナノテクノロジー・材料への期待も述べられていた。

日本の過去20年間の環境・エネルギー分野の研究開発活動を文献と特許に基づき分析してみると、廃水処理技術や逆浸透膜水処理といったキーワードが比較的良好に出現するものとして見えてきた。日本の研究開発の中でも比較的活発な領域であることを示唆している。こういった資産を今後はどう生かしていけるかというのも日本における研究開発のこれからを考える上では重要な視点ではないか。

以上を踏まえ、今回のWSでは、様々な分野の動向をご紹介いただき、水そのもの、あるいは水の機能性をナノ、ミクロのスケールあるいは材料の視点から深く理解し、よりよく制御、利用することができると社会課題の解決にどのような貢献があり得るかという点を横断的に議論したい。

水の利用といっても色々な捉え方があるが、広く捉えることで、従来の水関連分野の枠を越えた議論を行い、新しい潮流を生み出すような本質的かつ横断的な視座や切り口を探索していきたい。こういう趣旨から、今回は水利用、水処理、水循環、水資源分野のみならず、材料科学、計算科学、熱工学などの近隣分野の有識者の先生方も交えた議論の場を計画した。

本WSでは、全体を通じた共通認識を持つために、冒頭で基調講演という形で水利用、水処理に関連する大枠のお話を頂く。続いて3つのセッション「はかる」「わける」「つかう」に沿って進め、最後に総合討論を行う。総合討論では、分野を超えた横断的な議論という意味で、類似の視点、共通的に解明が求められる現象、あるいは研究課題などについて議論したい。また、それを踏まえて今後、分野を超えた連携の可能性があるかについても期待があれば伺いたい。他方、分野の違いが障壁となることもあり得るので、予想される困難や

留意点等もご意見があればぜひ伺いたい。今回はブレインストーミング的なWSであるため明確な結論を見いだしたいというわけではない。色々な感想、アイデアを持ち寄っていただきたい。

なお本WSで言う水の利用とは、水そのものを使う、例えば生活用水を使う、農業用水を使う、工業用水を使う、自然環境中の水、あるいは降水等ということに加え、水の機能性を使う、例えば様々な物質やイオンを運搬するという意味での水、反応の場としての水、溶媒としての水等の意味合いも含めている。

ワークショップの構成		敬称略
【冒頭】		
基調講演	滝沢智（東京大学大学院 工学系研究科付属水環境工学研究センター、センター長・教授）	
【セッション1：はかる】※計測・分析・モデリング		
フラッシュトーク	芳村圭（東京大学生産技術研究所、教授） 栗栖太（東京大学大学院 工学系研究科付属水環境工学研究センター、教授） 鷲津仁志（兵庫県立大学大学院 情報科学研究科、教授） 塩見淳一郎（東京大学大学院 工学系研究科、教授）	
【セッション2：わかる】※分離・回収、除去・浄化		
フラッシュトーク	手嶋勝弥（信州大学 先端材料研究所、教授） 足立泰久（筑波大学 生命環境学群、教授） 山下信義（産業技術総合研究所 環境計測技術研究グループ、上級主任研究員） 星野毅（量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー部門 ブランケット研究開発部増殖機能材料開発グループ 上席研究員）	
【セッション3：つかう】※水の利用、水存在下での材料の利用・機能発揮		
フラッシュトーク	花木保成（堀場製作所 エネルギー・環境本部、シニアマイスター） 寺坂宏一（慶應義塾大学 理工学部、教授） 森昌司（九州大学 工学研究院、教授）	
【セッション4：総合討論】		
全体を通じての討議参加 古米弘明（中央大学 研究開発機構、機構教授）		

 CRDS

©2024 CRDS

図 1-1 ワークショップの構成

2 | 基調講演

水利用分野におけるナノテク・材料の利用可能性

滝沢智（東京大学）

水利用分野についてお話しする。水利用と一言で申し上げても、我々の飲み水1リットルから、アメリカなどに見られる大規模なかんがい施設まで、様々な規模の水利用が存在する。それぞれ違った水源を使っている場合もあるが、同じ水源から様々な用途の水を取水している場合もある。

日本も過去に深刻な渇水を経験したが、今後グローバルな視点で見ると、特に人口急増が著しい南アジア、中東地域、そして2050年頃には、アフリカの人口も急増することが予想されており、元々水の少ない地域であるアフリカの水不足問題は、世界的にも非常に深刻化することが懸念される。

水問題は、図2-1に示すように、ナノメートル、オンGSTROOMレベルの世界から、地球規模の水循環まで、非常にスケールの広い問題である。本日のワークショップでは様々な分野の先生にお集まりいただいているが、それぞれの研究分野において得意なスケールがあると思う。

例えば、気候変動や地球規模の水循環に関しては、最も広範囲なスケールを扱う。水文・水資源となると少しローカルな視点になり、私が主に研究している地域の水供給や下水道は数キロメートル～数100キロメートル程度の範囲を扱う。

それに対し水質汚染や水処理技術に関しては、扱うスケールはさらに小さくなり、除去対象となる汚染物質はナノスケールである。このように水問題は非常に広いスケールを研究分野としてカバーしなければならない。本日のテーマであるナノテク材料は、既に半導体やデバイスには活用されているが、水問題を対象とした場合にはどうしてもスケールギャップが存在し、それをどう埋めていくかを考えていかなければならない。

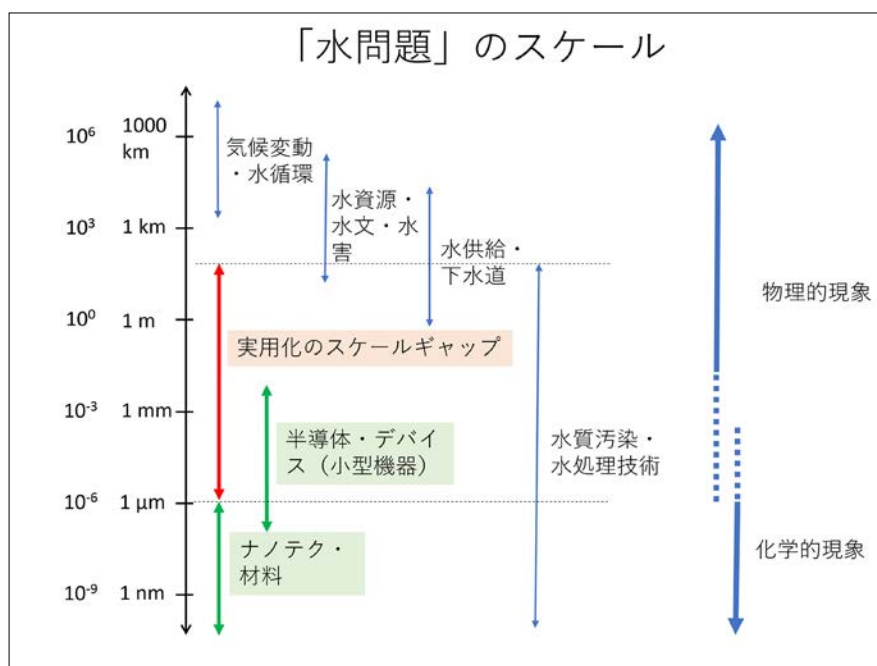


図2-1 「水問題」のスケール

水質汚染について考えると、汚染物質は1ミリメートル以下、ミクロン単位のものが多い（図2-2）。1ミクロン以下やナノスケールのコロイド、農薬、有機物質、微生物、原子といったものが存在し、ナノ材料が活用できるのは、こういったナノスケールの汚染物質に対してである。

研究分野でもスケールが大きくなるにつれ物理的な現象を中心に研究されていると思うが、ナノスケールになると、物理的な現象も扱うが、主に化学的な反応や専門的知識を用いることになる。

一方、図2-3に示す水処理技術では、伝統的に都市の水道で使用されている沈殿処理、凝集処理、砂ろ過といったものは、1ミクロンから1ミリメートル程度のスケールを対象としてきた。最近になり1ミクロンよりもはるかに小さい汚染物質が水環境中から検出されるようになり、それに対応する技術として逆浸透膜、低圧膜ろ過、逆浸透、吸着反応、酸化分解反応といったものを加えて、従来の水処理技術から新しい技術に変えていくことが考えられている。

こういった分野で研究が進んできているが、いずれにしても実用化には、ミクロなスケールで起こっている現象をいかにスケールアップし、より多くの水を処理できるかを考えていく必要がある。

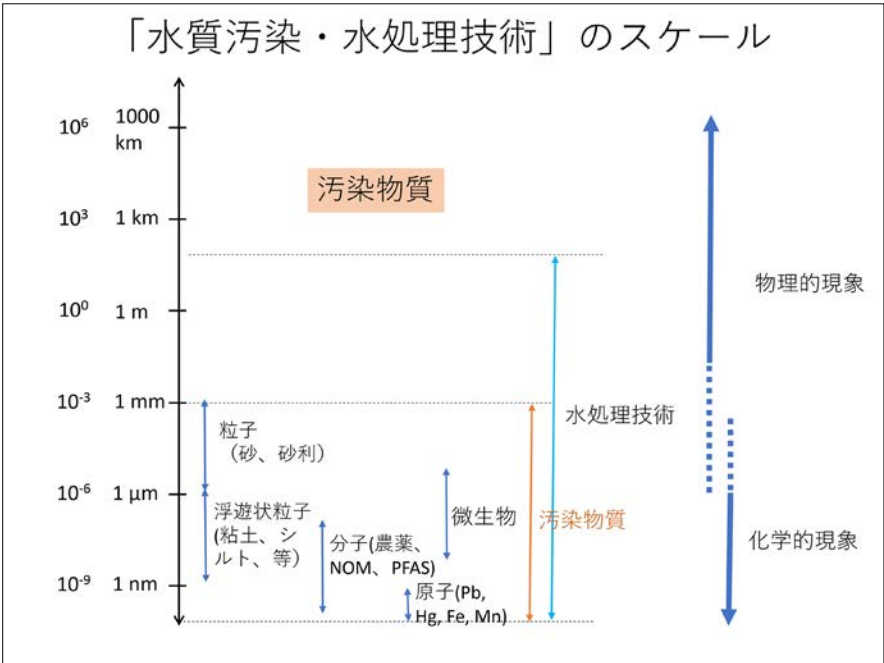


図2-2 「水質汚染」のスケール

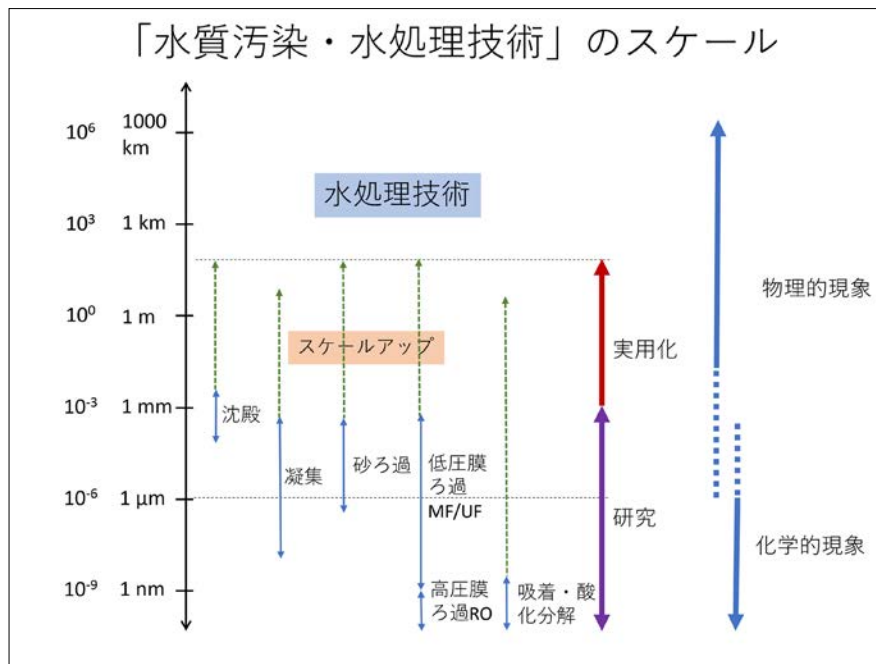


図 2-3 「水処理技術」のスケール

ここからは、いくつかの水処理技術、水利用技術について紹介する。初めに、一般的に使われている低圧膜ろ過は、MF 膜、UF 膜と呼ばれる膜を用いた水処理技術である（図 2-4）。材料としては有機系、無機系のものがあり、加圧や吸引といったいくつかの操作法がある。国内では、既に 1,200 カ所程度の浄水場でこういった低圧膜ろ過が使われている。

低圧膜ろ過

無処理または凝集剤を添加した原水を、低圧膜（MF、UF 膜）によりろ過し、濁度やバクテリアなどを除去する方法

項目	種類	特徴
膜材質	無機膜	丈夫で長持ち、但しコストが高い
	有機膜	無機膜よりは短寿命だが PVDF 膜は強い安価で、種類が豊富、軽く扱いやすい
加圧方式	加圧法	原水側から加圧してろ過する標準的な方法
	吸引法	ろ過水側から吸引してろ過する方法 MBR などの浸漬膜に用いられる
ろ過方式	クロスフロー方式	膜供給水を加圧循環して、膜表面への汚染物質の堆積を防ぐ方法 但し、エネルギーコストが高い
	デッドエンド方式	単純に膜供給水を加圧してろ過し、定期的に洗浄する方法
流量・圧力制御方式	定流量法	ろ過流量一定となるように圧力を制御する
	定圧法	ろ過圧力が一定になるように制御する、ろ過流量は変動する。

図 2-4 低圧膜ろ過

それに対して高圧膜ろ過は、NF膜やRO膜（逆浸透膜）を用いた水処理技術である。一般的な用途としては海水の淡水化が挙げられる。海水取水後に前処理を行い、高圧逆浸透と低圧逆浸透を組み合わせ、最後にイオン分を調整して生産水とする。逆浸透膜材料としては主に2種類あり、1つは中空糸型の三酢酸セルロース膜で、これは東洋紡が生産している。この膜は国内では福岡の海水淡水化施設で使用されており、海外ではサウジアラビアの海水淡水化施設で採用されている。もう1つは東レ、日東電工、ダウなど複数の企業が製造するポリアミド膜である。この膜は世界中の多くの海水淡水化施設で使用されている。

国内で最初に大規模な海水淡水化施設として造られたのは、沖縄県企業局が運営する施設である。この施設は、沖縄の水不足や渇水対策として建設された。海水淡水化施設の利点は、無尽蔵にある海水から季節を問わずいつでも水を確保できることである。この施設の造水能力は日量4万m³あり、沖縄県企業局は1日に約40万m³の水を作っていることから、その10%を海水淡水化で賄うことができる。基本的には、海水淡水化施設は渇水が発生する可能性の高い時期のみ稼働させるスタンドバイモードで運用されている。一方、海水淡水化の問題点としては、エネルギー消費量が多くコストが高いこと、維持管理に手間がかかることが挙げられる。

海水淡水化のプロセスは、一般的な浄水場と比べて比較的複雑である。海水を取水後、まず砂を沈殿させ、砂ろ過で2段ろ過を行い、スケール調整剤や除去剤を添加してからフィルターを通して高圧ろ過を行う。この過程で2種類の廃水が発生する。1つはブラインと呼ばれる濃縮海水であり、それを海に戻すプロセスが発生する。もう1つはいわゆる廃水であり、何らかの処理後に排出する必要がある。

もう1カ所、福岡も水不足が非常に深刻な地域であり、国内最大規模の海水淡水化施設「まみずピア」が建設された。造水能力は1日最大量5万m³である。この施設の特徴は、浸透取水方式と呼ばれる方法を用いて海水を取水していることである。先ほどの沖縄の施設では、海に取水塔を設けて直接海水を取水していたが、福岡の施設は海水を直接取水するのではなく、海の下に穴の開いたパイプを広い範囲に敷設し、海水が自然にパイプ内に入る仕組みになっている。取水施設の周りには2m程度の厚さの砂の層があるため、砂ろ過をした海水を取水ことができ、環境に配慮した設計になっている。

当初、まみずピアでは海水を取水した後、UF膜で前処理をしてから高圧RO膜、低圧RO膜で処理を行い、イオンや塩分を調整して供給するという方式であった。しかし、この浸透取水方式の性能が良く、UF膜がなくても直接高圧RO膜処理にかけられる可能性が考えられた。過去3年ほどのパイロット実験を経て、2023年にUF膜を撤去し、直接高圧RO方式が導入された。これは世界でも非常に珍しい方式である。

近年、従来の逆浸透（Reverse Osmosis）ではなく、図2-5に示す正浸透（Forward Osmosis）と呼ばれる新たな技術が注目されている。海水から真水を取り出す際、通常は逆浸透なので海水側に高圧をかけて逆浸透膜を通過させ水を得る。これに対し正浸透は、海水よりもさらに塩分が高いドローソリューションと呼ばれる溶液を用いて、海水から水を抽出する技術である。海水からドローソリューション側に水を引き抜き、何らかの方法で水とドローソリューションを分離することで、真水を得ることができる。ドローソリューションに何をを使うかが非常に重要であり、比較的沸点が低い溶媒を用い、60℃程度に温めて蒸発させることで水と分離する方式などが考えられている。しかし、正浸透膜を用いた大規模な海水淡水化施設はまだ数カ所に留まっており、実用施設を造るには課題が残されている。

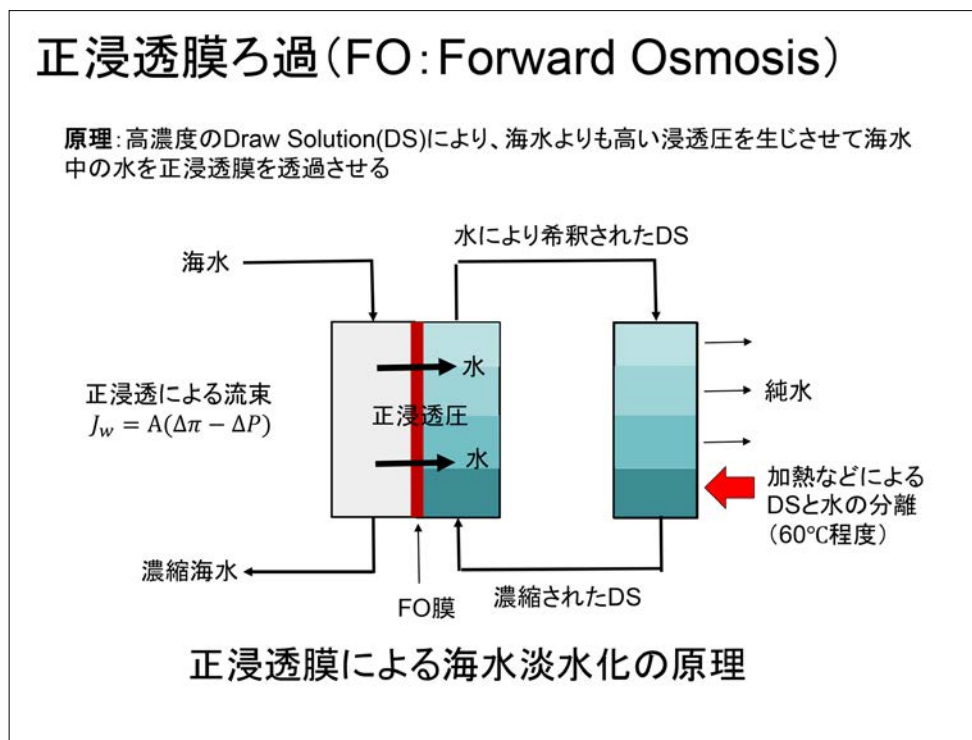


図 2-5 低圧膜ろ過

正浸透膜技術の用途を図 2-6 に示す。海水淡水化などの用途が期待されており、小規模な施設はいくつかあるが、大規模な施設はまだ建設されていない。逆浸透法と比較し建設コストやエネルギーコスト等の面で優位でなければ、大規模な施設の建設は難しい。

また、発電の用途もある。海水と淡水を用いた正浸透による水流を使って発電をする。福岡のみみずピアでは、海水淡水化によって発生する濃縮水と下水処理場の処理水の濃度差を利用した発電プロジェクトが 2025 年 4 月の稼働を目指して進行中である。発電量が 1 日 110kW、濃縮海水の使用量が 1 万 m³ を見込んでいる。これは国内初の取り組みであり、世界的に見ても極めて珍しい技術である。

他の用途としては、緊急用の浄水器として、汚染された水をグルコースや生理食塩水などで浄化して飲用水としたり、尿を分離する用途も考えられる。冷却塔や空調に使われることもある。

正浸透膜ろ過(FO)の用途

1. 海水淡水化
 - ・ 小規模な施設はあるが大規模施設はまだない
 - ・ 逆浸透法との建設・エネルギーコストや維持管理性を比較する必要がある¹⁾
2. 発電
 - ・ 海水と淡水を用いた正浸透による水流により発電する
3. 緊急用の浄水器
 - ・ 非常時に、汚染された水をグルコース、生理食塩水などを含む水で「浄化」して飲む
 - ・ 尿を同様な原理で分離して飲む
4. 冷却塔、空調
 - ・ 海水から補給水を得る

1) <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.05.061>

図2-6 正浸透膜ろ過(FO)の用途

続いて、下水の再利用について図2-7に紹介する。特に水不足が深刻な地域で注目されており、カリフォルニア州では1960年ごろから地下水の過剰な取水による内陸部地下への海水浸透を防ぐため、処理した下水を地下に注入していた。近年では、下水を処理して直接飲用することに向けて、さまざまな調査が行われている。

日本でも水不足対策として下水の再利用が促進されており、東京都の三河島下水処理場の水を工業用水として供給したのが先駆けである。近年では、東京の新宿や臨海部でトイレの洗浄水や修景用水として下水再利用水が活用されている。

シンガポールも水不足の国であり、マレーシアから大量の水を安価に購入しているが、契約更新がされない場合には水不足に陥る可能性があるため、処理技術を活用して飲料水レベルの水を作っている。

カリフォルニア州のOrange Countyでは、Groundwater Replenishment Systemという地下水涵養システムを導入し、処理した下水を注入することを前提にプロセスを組んでいる。下水を粗いスクリーンにかけ、口径が0.1ミクロン程度の膜でマイクロフィルトレーション処理をし粒子状のものを除去し、その後逆浸透膜処理、紫外線等による消毒で副生成物を分解するという3段階の処理を行う。処理後は地下水に注入し、少し離れた地点から地下水をもう一回揚水して再利用する。

下水の再利用

1. カリフォルニア
 - 1960頃から、海水の地下水への浸入を防ぐため、下水処理水を地下水に注入
 - その後、修景用水、散水などに利用が進む
 - 直接飲用利用に向けて、法制度を整備している
2. 日本
 - 東京都で水不足と地盤沈下対策として三河島下水処理場のろ過水を工業用水として利用
 - 現在は、東京などで、トイレの洗浄水、修景用水に利用
3. シンガポール
 - マレーシアから大量の水を安価に購入しているが、契約の更新期限が近付いている
 - NEWATER: 下水の高度処理水を主に工業用水として利用
 - 単価は水道水よりもやや高い
 - PUBは、飲料水としての利用率を高めたい

図2-7 下水の再利用

最近出てきた技術として、大気造水（AWG：Atmospheric Water Generation）について紹介する（図2-8）。これは、大気中の湿度から水を回収して利用する技術である。2つの方法があり、1つは家庭用エアコンと同じように凝縮して水を回収する方法、もう一つは何らかの吸着剤を使って、大気中の水を吸収する方法である。造水量としては数十リットル程度であり、何トン、100万トンという単位を扱う技術ではなく、少量の造水技術である。

この技術は、もちろん湿度が高い地域のほうが回収しやすく、一般的には大気中の湿度が相対湿度60%以上ないと成り立たないと言われている。湿度が非常に高い地域では大気造水が有効である可能性がある。こういった特異的な技術については、イスラエルが非常に熱心に関心を持っている。Watergenという会社は、イスラエル軍の水需要に応じることを目的として、2009年に設立されたベンチャー企業である。食品製造にも使用可能なポリマーを用いて、熱交換器を使って水蒸気を凝縮する技術を持つ。金属を使わないため、水の金属汚染の恐れがない点が特徴である。Sky Sourceというアメリカの会社は、バイオマスを用いて大気中の水蒸気を吸収する技術を持つ。バイオマス中の水分を利用することで、造水能力としては1日当たり最大2,000リットル、コストとしては1m³当たり20ドル以下で作れるという。スウェーデンのDruppsという会社は吸湿剤を使い水を吸収する技術を持つ。エネルギー使用量は多いが、増水量は1日当たり20万リットルと多く、産業用水として使えるほどの水量を作ることができる。また、アメリカのSOURCEという会社では、太陽光を使って造水する技術を持つ。大気造水については、現状ではボトル水の代替程度の用途ではあるが、将来的には非常用水や移動式の給水車、軍事用等に使われる可能性もあり、発展に伴い産業用水への利用も期待できる。

大気造水（AWG: Atmospheric Water Generation）

大気造水技術の種類と現状

- ・ 2つの大気造水法：凝縮法(condensation)と吸収法(absorption)

凝縮法(condensation)：

- ・ 除湿器と同様の原理で待機中の水分を凝縮する
- ・ エネルギーコストが高いが、大量の水を造水することができる
- ・ 市場に出ているAWGで最も一般的に用いられている造水法
- ・ そのため、競争が激しく、各企業は独自性を出すために苦労している

吸収法(absorption)

- ・ 水蒸気(水分: moisture)を含んだ空気を乾燥剤(吸着剤)を含む流路に流して、水蒸気を吸収させる方法
- ・ 凝縮法よりもエネルギー効率が高く、幅広い気温、湿度の条件で作動する
- ・ しかし、現時点での最大造水量は50 L/dにとどまっている

図2-8 大気造水

大気造水は非常に面白い技術ではあるが、図2-9に示すように幾つか課題も指摘されている。維持管理に関し、フィルターや塩分添加装置の交換が必要となる。また、水質の管理については、AWGは飲料水水質に適合した水を造水できるとイスラエルでは主張しているが、一方アメリカ環境保護庁（US EPA）は幾つかの市販されているAWGを調査し、微生物増殖のリスクを指摘している。そのために、AWGは定期的に塩素やオゾンによる消毒が必要であるというのがEPAの見解である。

販売市場については、Watergenの例では産業用装置（処理能力：1日当たり250リットルから6,000リットル）としては、学校や病院、コミュニティセンター、非常用水に利用できるとしている。オフィス、家庭用（処理能力：一日あたり50リットル）は冷水器等の代替用として利用できる。移動車に乗せた移動用用途では、AWGはボトル水よりもコストが安いとも言われている。ボトル水の運搬が大変な地域では、AWGの利用余地が出てくるのではないかと考えられている。参考コストは1リットル当たり9セント、1 m³当たり90ドルで、約14,000円となる。水道水に比べると100倍程の値段だが、それでもボトル水よりは安価である。参考として、南大東島の海水淡水化施設の造水コストは1 m³当たり1,200円とされ、AWGはその10倍程度のコストがかかるが、活用の仕方も含めて少しずつ発展していく分野なのかもしれない。

大気造水(AWG)の課題

維持管理 Maintenance

- ・ フィルターや塩分添加装置の交換(数カ月一度)

水質 Water quality

- ・ AWG は、イスラエルの飲料水水質基準に適合した水を造水できる
- ・ アメリカ環境保護庁(US EPA): AWG装置内で微生物が増殖する恐れがあり、塩素消毒またはオゾンによる消毒を推奨する

販売市場: Watergenの事例

- ・ 産業用装置(250 – 6,000 L/d): 学校、病院、コミュニティセンター、非常用水の供給
- ・ オフィス、家庭用(50 L/d): オフィスや家庭での冷水器(water cooler)の代替用
- ・ 移動用: 移動式の飲料水水源として利用
- ・ AWG can reduce plastics used for bottled water.

コスト (US EPA, 2018)

- ・ GENNY(Watergen): ボトル水の1/4のコスト
- ・ GEN-L:(Watergen): \$0.09/L = \$90/m³. 水道水 < AWG < ボトル水

エネルギー消費

- ・ 350-600 kWh/m³.

<参考>

海水淡水化(南北大東島)1,200円/m³

図2-9 大気造水の課題

水利用、水処理分野におけるナノ材料の活用というのが本日のテーマであるが、活用の仕方としてはろ過膜として活用する方法、吸着剤として活用する方法、酸化・還元反応を活用する方法がある(図2-10)。膜処理を中心に紹介していくが、膜をナノ材料を固定化する単体、単離するものとして使う事例が増えており、膜ろ過だけではなく、吸着剤や酸化剤としての活用も進んでいる。

水利用・水処理分野におけるナノ材料の活用

<膜ろ過 Nano-composite membrane>

- ・ ナノ材料をRO膜やUF膜を作成し、水の透過性の向上と、汚染物質の阻止性の向上に活用する
- ・ ポリアミドなどの膜材料と混合する方法と、膜表面にナノ材料を塗布する方法がある

<吸着剤 Adsorbents>

- ・ 無機、有機吸着剤
- ・ 吸着後にナノ吸着剤を水と分離する必要がある。
- ・ Feなど磁性吸着剤を、磁力で分離する方法
- ・ 水と分離しやすい担体や膜にナノ吸着剤を担持する

<酸化・還元剤(触媒) Redox catalysts>

- ・ 反応後に、水と分離する必要がある
- ・ 水と分離しやすい担体や膜にナノ吸着剤を担持する

図2-10 水利用・水処理分野におけるナノ材料の活用

この分野でナノ材料に関して関心が高まった1つのきっかけは2001年に『Nature』に出された論文¹である。疎水性のカーボンナノチューブの中を水の分子が移動するモレキュラー・ダイナミクス・シミュレーションを公表した論文が出版された。5年後に『Science』から、実験でナノチューブを作成し、そこに水や気体を投下させる実験についての論文が出版された²。それによってこれまで考えられていたような水の流れと比べ、カーボンナノチューブ内での水の流れは約1,000倍、3桁ぐらい速いと言われるようになり、こういった基礎的な論文成果が水処理分野で利用できるのではないかと期待が高まったことは非常に大きいと思う。

現在、ナノ・コンポジット・メンブレンというナノ材料と膜をいろいろな形で複合させる研究も活発である。基本的な作り方は幾つかありうるが、膜の中にナノ材料をそのまま入れ込み固定化する方法と、膜の表面にナノ材料を何らかの形で担持させる方法がある。それによってどれぐらい成果が出ているのか、通常の逆浸透膜を使った難分解性の微量汚染物質の除去率についての報告がある。横軸を分子量、縦軸をリジェクションという除去率で表したグラフ上に既存の文献からのデータを整理すると、分子量が大きくなるに従って除去率が上がっていくことが分かる。また同じ分子量でも親水性、疎水性、その他分子の構造によって除去率は変わってくる。レンジとしては40%～60%の除去率のものが多い。

ナノコンポジット膜の除去率の報告を図2-11にまとめた。図2-11(1)はろ過だけで除去をしているもので、除去率がやや低いのがNDMAで60%程度、それ以外は大体80%から高いところでは90%を超えるような値が報告されている。ろ過膜にナノ吸着剤を担持させた複合膜については(図2-11(2))、低いところでは60%台であるが、高いところでは80%、90%の難分解性物質が除去されているという報告がある。ろ過膜に光分解を組み合わせた場合(図2-11(3))は、汚染物質にもよるが、非常に高い除去率が得られたという報告がある。ろ過膜に生分解酵素を固定して分解した事例(図2-11(4))では、こちらも高い除去率が得

1 Hummer *et al.*, 2001, Nature, vol. 414, 188.

2 Holt *et al.*, 2006, Science, vol. 312, 1034.

られている。こういったさまざまな組み合わせによって、これまでの技術では除去できなかったものが高除
去率で分解ができるという報告が近年なされてきている。



図 2-11 ナノ複合膜による難分解性微量汚染物質除去

(1) 膜ろ過による除去、(2) 膜ろ過+吸着による除去、
(3) 膜ろ過+光分解による除去、(4) 膜ろ過+生分解による除去

最後に、我々の近年の研究成果についても幾つかご紹介させていただく。2001年には『Journal of Membrane Science』にて、graphene oxide (GO) /carbon nanotubes (CNTs) 層を膜の表面に担持した際に、どのような分子で担持させることによって、除去率等の性能が変わることを最初に報告した³。2024年には『Chemical Engineering Journal』にて、sulfate doped LDO/CNという光触媒作用を持つ物質を担持させ、分解を進めたという事例を報告した⁴。また、膜表面で微生物が増殖し膜機能が低下するバイオフィアウリングという問題に対し、ナノプラスチックが流入したり、あるいは意図的に添加した際にどうなるかを評価した報告もされている⁵。ナノプラスチックを添加することによって、膜のファウリングがある程度抑えられることが明らかとなった。最後に、こちらもバイオフィアウリングの関連の研究を紹介する。韓国の Chung-Hak

3 Zhao *et al.*, 2021, J. Membr. Sci., vol. 617, 118616.

4 Gao *et al.*, 2024, Chem. Eng. J., vol. 482, 149034

5 Liu *et al.*, 2024, Water Res., vol. 253, 121268.

Lee教授は、ろ過膜におけるバイオフィウリングの主な原因が、微生物によるクオラムセンシングであると最初に指摘した。クオラムセンシングとは、微生物が特定の化学物質を排出して、それがきっかけになり集団行動を開始する現象である。このことから、我々の研究グループでは、逆浸透膜にクオラムセンシングのインヒビター（阻害剤）を添加することによって、バイオフィウリングを抑えられることを示した⁶。このように我々のグループも含めて、近年、非常にアクティブにこの分野の研究がされている。

図2-12にまとめる。水利用の課題としては、特に親水性の難分解の低分子の汚染物質の出現がある。RO膜による除去を行ってきたが、それにはやはり限界があり、除去率が50%～60%程度に留まる。それを乗り越えるための技術として、ナノ材料とさまざまな膜との複合が期待され、いろいろなところで研究開発が進んでいるのが現状である。

まとめ

- 水利用の課題
 - ✓ 親水性難分解低分子汚染物質の出現
 - ✓ RO膜による除去に限界がある
- ナノ材料の活用
 - ✓ 水処理用：ナノ複合膜、吸着剤、触媒
 - ✓ CNTの疎水性空間を水分子が高速で透過
 - ✓ ナノ複合膜による研究の活発化と汚染物質の除去率の向上が報告されている
 - ✓ 指標：透水性向上、汚染物質の除去率向上
 - ✓ 実用化への課題：膜の耐久性、大型化、コスト

図2-12 まとめ

6 Chen *et al.*, 2024, Water Res., vol. 253, 121358.

3 | セッション1：はかる

3.1 水の同位体の利用

芳村 圭（東京大学）

水の同位体、安定同位体には H_2^{16}O の水、 H_2^{18}O と HDO がある（図 3-1-1）。それぞれの分子は相変化に敏感であり、水循環、特に自然な水の循環における相変化を伴う位相に対して感度を持つため、それ自体を測ることで水のトレーサーになるという非常に便利な点がある。また環境中にいくらでもあるため基本的にいつでも測ることができる。ただし観測技術は質量分析計からレーザー分光計、衛星に搭載された分光計へと発達してきており HDO と H_2^{18}O のどちらの分子も見られるようになっている。

モデリングもかなり進展している。以前は古典的な理解、定性的な理解だったが、今は気象予報、気候予測に使われる大循環モデル、いわゆる気候モデルに同位体を入れ、現在どういふうに水の同位体が分布しているのかということや、氷期、間氷期といった気候分野のプロキシとして非常に強い物質であるため気候スケールのシミュレーションに使われている。

今日お話ししたいのは図 3-1-1 の右側に示した内容である。水蒸気同位体比の測定が可能になっているが、データ同化によりそれを使うと天気予報が良くなるということをお話していきたい。

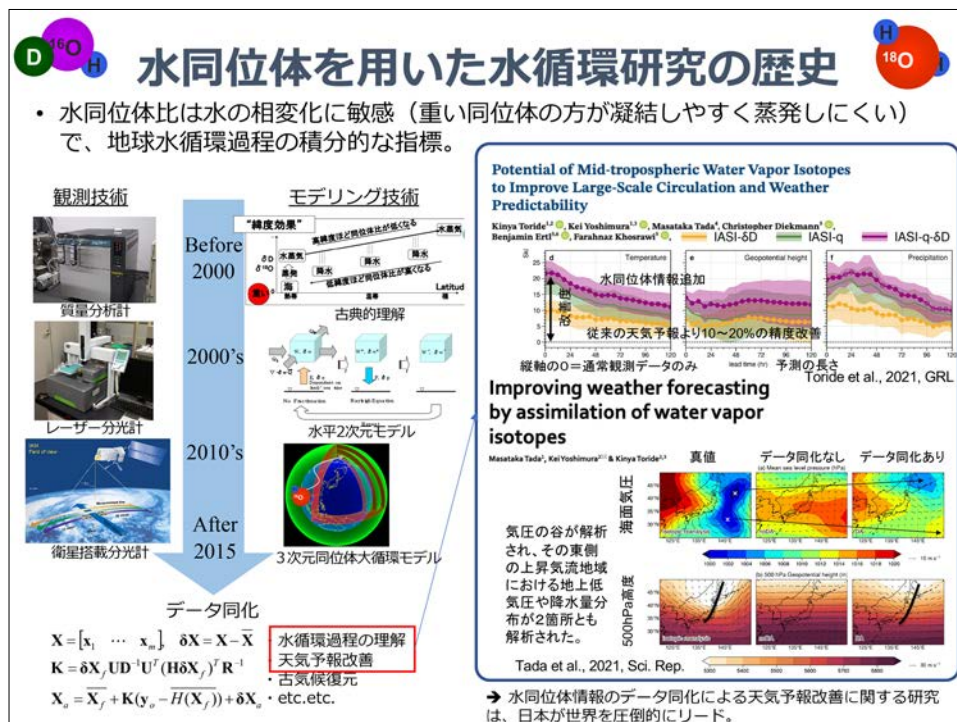


図 3-1-1 水同位体を用いた水循環研究の歴史

かつての分析手法は、その場に行って水のサンプリングをし、戻って質量分析をやったということだった。今もやっている。しかし分光技術が発達したことによって今では人工衛星に載せた分光器から水蒸気同位体比を測ることができるようになった。Scienceに掲載されたFrankenberg, Yoshimura *et al.* (2009) では、

人工衛星 Envisat に搭載された近赤外分光計 SCIAMACHY を用いた全球地表面水蒸気同位体比の観測結果と、私が作成したモデルのシミュレーション結果がほぼ一致していたことを報告している⁷。

これまで観測のほうを言ってきたが私の専門は基本的にはシミュレーションである。計算機の中でどういふに水の循環を再現するかという気候モデルの開発に携わっている(図3-1-2)⁸。水の同位体を入れると色々なことが分かる。特に、相変化に対して敏感ということは降水過程、蒸発過程の理解につながるため、研究室レベルで分かる相変化の分別という非常にベーシックなことをモデルに組み込み、そのシミュレーションを行っている。

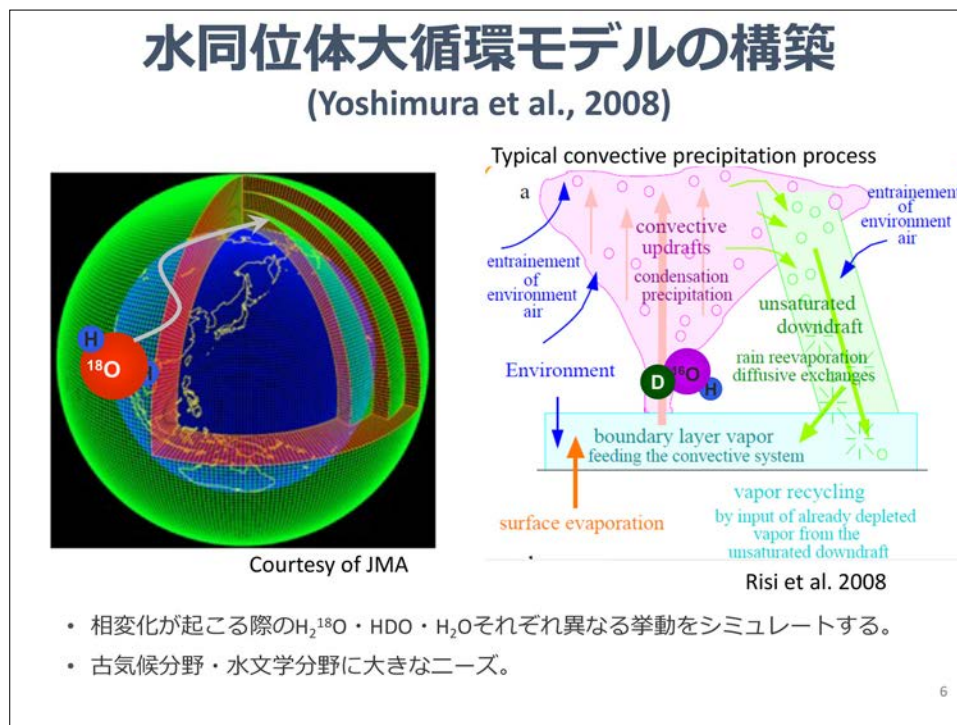


図 3-1-2 水同位体大循環モデルの構築

モデルと観測ができるようになると、気象や水文の分野ではその2つを融合させて予測技術を高めるデータ同化という世界に自然に踏み込んでいくことになる。観測技術が発展したことによって水蒸気同位体比が分かるようになったとしたらご利益として何があるのかということを示したのが2014年の論文である(図3-1-3、図3-1-4)⁹。

図3-1-4について、上のグラフは黒が気温の真値で緑が推定値である。黒と緑が離れている部分は予測ができていないことを示す。ここで、下のグラフに示すように水蒸気同位体比情報を与えると、理想的な状況では気温の予測が可能になる。気温が同位体比に対して影響するのではなく、同位体比が水循環の中で常に何かしら気温や風速の影響を受けているため、その情報を教えてあげることで、原因が分かっていくということである。

⁷ Frankenberg, *et al.*, 2009, *Science*, vol. 325, 1374-1377.

⁸ Yoshimura *et al.*, 2008, *J. Geophys. Res.*, vol. 113, D19108

⁹ Yoshimura *et al.*, 2014, *J. Geophys. Res.*, vol. 119, 7842-7862

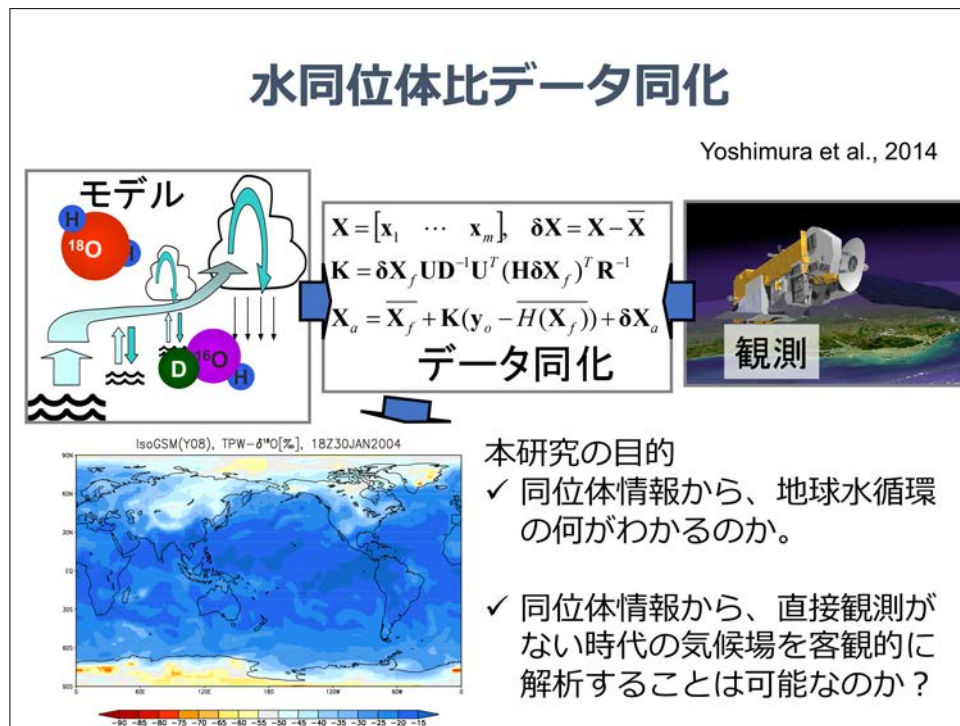


図 3-1-3 水同位体比データ同化

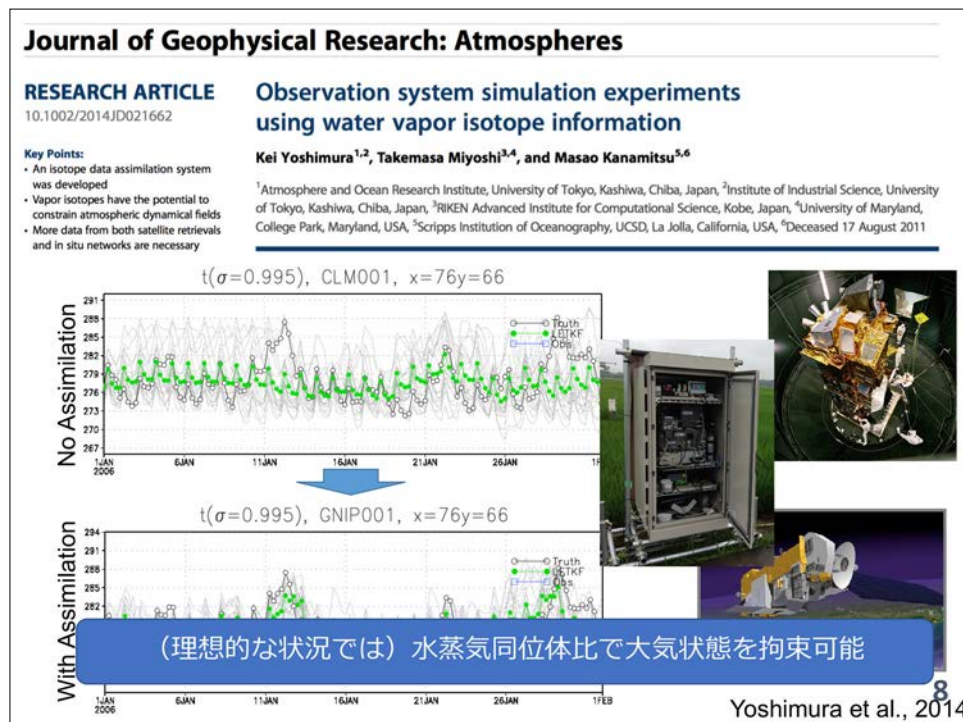


図 3-1-4 Yoshimura et al. (2014)

ここまで理想的な状況でのことをやっていたところ、ヨーロッパの極軌道気象衛星に搭載されたIASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) により毎日のスナップショットがグローバルに捉えられるようになってきた。これは今も続いており一日約16万個のデータが取れている。そのためこのデータを

使ったデータ同化を始めた。ただ、そうとはいえ同位体比なので、基本的には皆さんの生活に直接関わるような話ではない。天気予報だと雨や気温の情報が知りたいが、そういった情報は基本的にはちゃんと測られているため同位体だけ分かっているかもしれない。そこで今まである観測の上に同位体が加わることで天気予報の精度がどれくらい上がるのかを検討したのが図3-1-5以降で示す研究である¹⁰。観測量は従来型と比べて2.1%の増加になる。

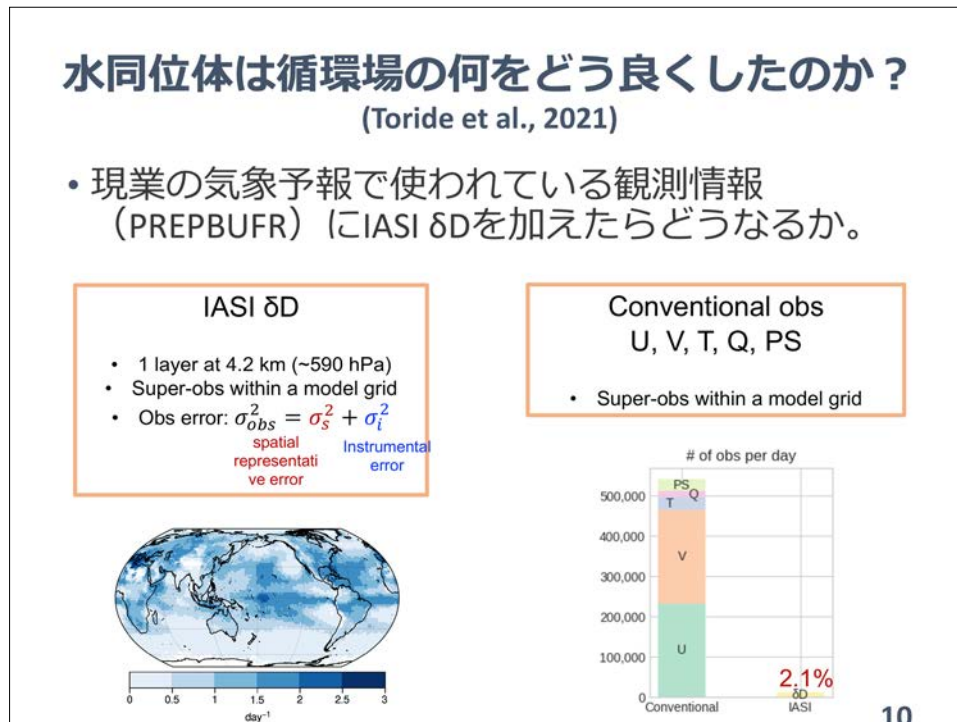


図 3-1-5 水同位体は循環場の何をどう良くしたのか？

図3-1-6は、同位体比を教えるということは、水蒸気同位体比だけではなく、風や気温や降水量の拘束にも使えるということが示されている。上側中央の図が東西風、右側が雨の結果を示している。赤いと予測精度が良くなっていることを表す。下側の図は特に上昇流のあるところで同位体比を教えるとご利益が上がることを示している。それはなぜかと言うと、上昇流には常に雨が伴う。つまり潜熱が発生する。潜熱がそこで起こるということは、水の同位体比は相変化に対して敏感なので、潜熱に対して変わる。その情報を教えてあげることで、水の循環、水蒸気の循環が拘束されていくということになる。

¹⁰ Toride et al., 2021, Geophys. Res. Lett., vol. 48, e2020GL091698.

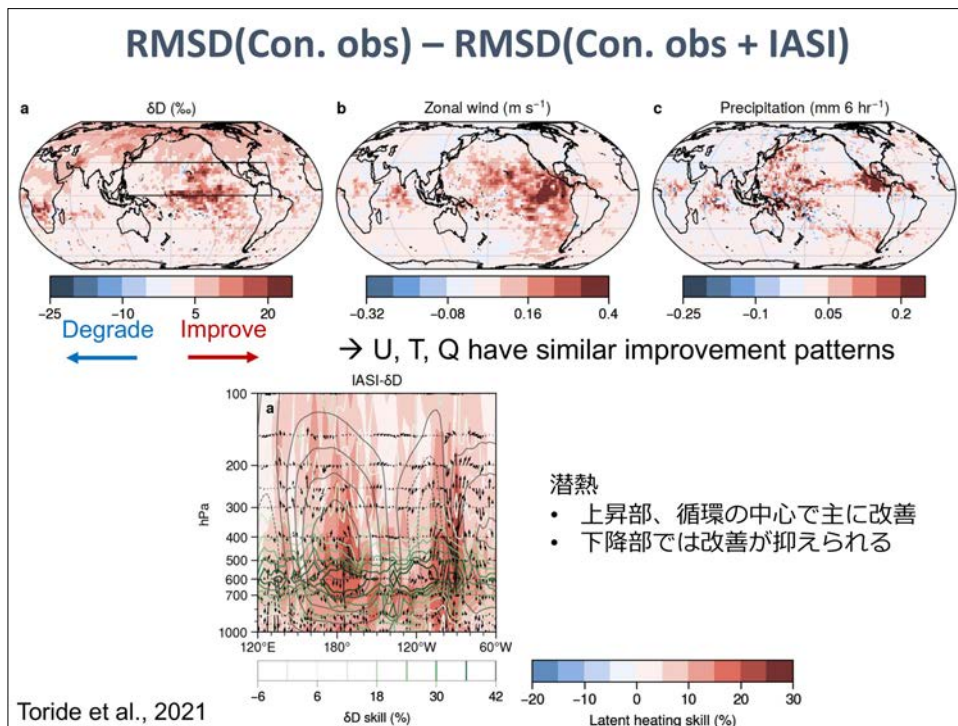


図 3-1-6 予測精度の改善

先ほど申し上げたように観測量は2.1%の増加だが、予報スキルがかなり上がる。この意味することは、これまで観測情報として使っていない、気象予測には使われていない情報を入れることによって、気象予測の精度が上がるということになる。図3-1-7のグラフ縦軸はパーセントで示されており上に行くほど予測精度が上がることを示す。横軸は予測時間になっており、長ければ長いほど予測性能は下がるが、同位体ありの場合は常に少しだけ予測性能は良くなるということが分かった。

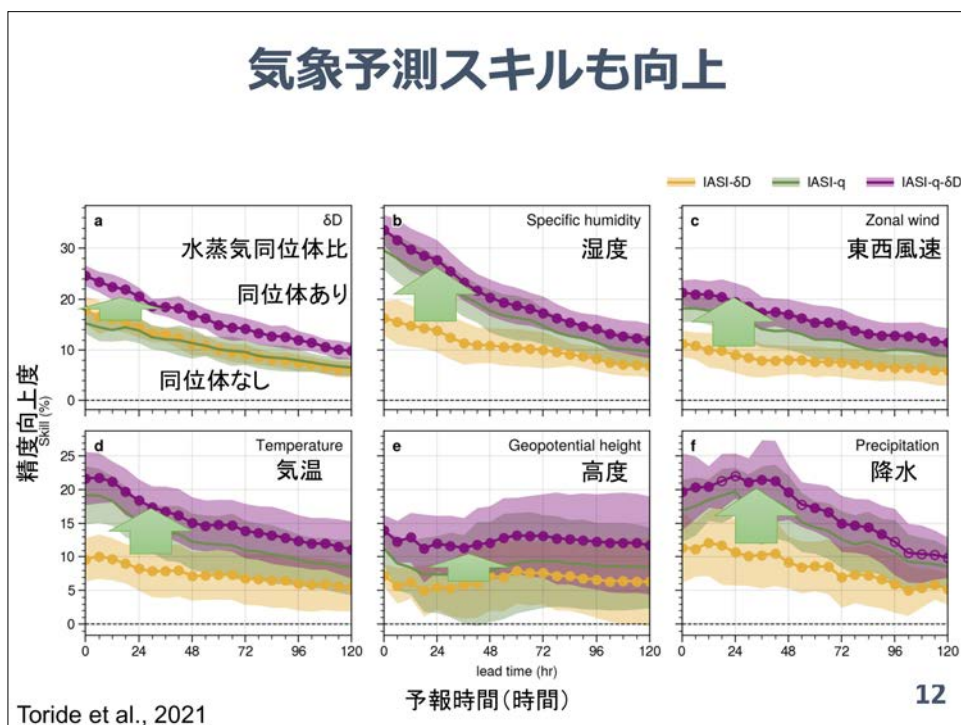


図 3-1-7 気象予測スキルも向上

こうしたことを衛星をあげて観測を行う前に実験する。いよいよ実際に観測機を上げてどうだったと言うと、実際のデータを使っても今まで見られていたご利益は得られた。予測には色々な誤差が含まれているので実際の観測情報を入れても必ずしも予想していた通りにならないということがよくあるが、同位体の場合は割と予想されたとおりに良い効果が得られた。具体的には上昇流があるところ、つまり潜熱のやりとりがあるところ
 で改善が大きいことが分かった。

横軸に雨の強さ、縦軸に予測性能の改善度を表した図を作成すると、雨の量が強いほど、雨の勢いが強いほど、同位体情報を教えてあげることで予測性能が良くなることが分かった。つまり、こういったことは全く予想していなかったが、よくよく考えると当たり前で、要は凝結がたくさん起こっているところでは同位体比が変わりやすいので、そこに情報を与えてあげることで精度が良くなるということになる。翻って言うと、これは強い雨ほど予測精度が良くなるということであるので、同位体比を観測して、データ同化するということには防災のような観点でも意味があるということになる。社会に役立つと思っていなかったが、役立てさせることはできそうということが分かってきた。

こういったことが分かってきているため、新たな衛星観測ミッションを立ち上げようと活動している（図3-1-8）。水の同位体比は観測の行われていないところがまだ多いので、今回提案しているのはテラヘルツという波長帯を使って上部対流圏の同位体比を調べるということ。今では衛星が数億円で上がるので、そうした衛星を打ち上げて色々なサイエンスをやってみたい。

新たな衛星観測ミッションを提案中

- ・ 現在未観測の対流圏上層の水蒸気同位体比を、世界初の試みとしてTHz帯の波長を用いて観測する。
- ・ 放射計による水蒸気同位体比の観測実績は世界でもまだなく、観測データの無い上部対流圏と、6割以上を占める被雲時の観測に威力を発揮する。



図 3-1-8
 新たな衛星観測ミッションを提案中

3.2 水環境における未規制有機汚染物質のスクリーニング分析

栗栖太（東京大学）

水中に溶けている物質、水質についての話をする。特に、問題が顕在化している物質ではなく、問題かどうか分からない、そもそもどのぐらいの量があるか把握されていない物質を、どこまで把握することができるのかというところから考えてみる。

河川流域の水利用では、上流で使用された水が処理水として放出され、下流で再度取水されるという、間接的な再利用が行われている現場が多数ある。そのような場所にはさまざまな自然由来の有機物に加え、人間活動に伴う有機物や副産物的な有機物なども存在する（図3-2-1）。

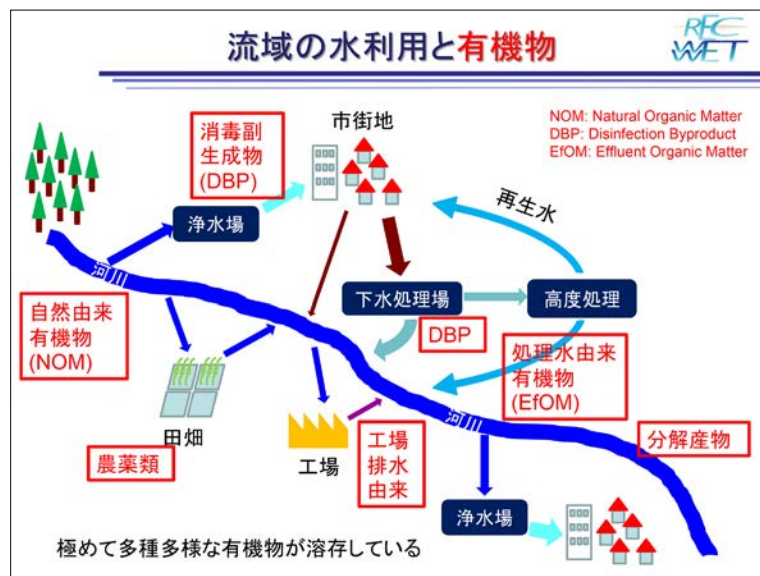


図3-2-1 流域の水利用と有機物

これらの水質汚染物質に対する日本の監視体制を図3-2-2に示す。環境省の定める公共用水域の水質基準では、環境基準として15物質、要監視項目として24物質、さらに最近では300物質を超える要調査項目も定められている。水道水質についても同様に対象物質が指定されている。一方で、現在地球上で知られ、データベースに登録されている化合物は約8,000万種あり、日常的には数万種の化合物が使用されている。さらに、それが環境中に放出された際、もしくは水処理を行った際に、別の物質に転換する場合もあり、水質の監視体制として、現状のモニタリングの対象物質数で十分かという疑問が生じる。

現在の監視体制では、各物質ごとに精度管理し、定量分析を行うことが主流である。これは信頼性は高いが、コストが非常に高いことから対象物質数を増やすことができないという問題がある。一方で、今後求められる方向性として、できるだけ多くの物質をスクリーニングで把握し、その中で問題がありそうな物質を詳細に分析していくという戦略が提案されている。

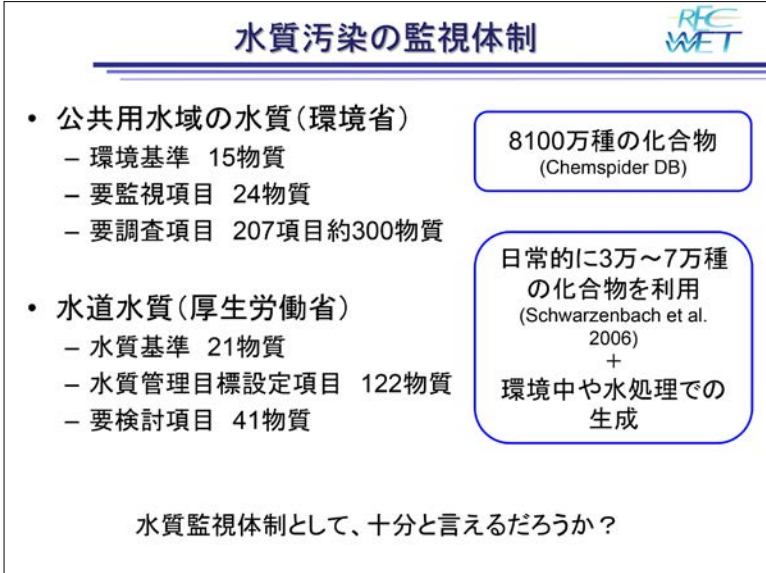


図 3-2-2 水質汚染の監視体制

質量精度が高い精密質量分析計を用いることによって、特に有機物に関しては、ある程度達成ができることが最近実証されてきた。これは、通常の質量分析と比較して質量精度、分解能ともに非常に高い。図3-2-3のグラフは横軸が質量を表し、それに対し、四重極型質量分析、飛行時間型質量分析 (TOF-MS)、Orbitrap 質量分析と質量精度が上がっていくにつれ、質量が非常に近く構造が全く違う2種の物質を分離して別々に検出できる。このような技術を用いることにより、多物質の一斉分析や、測定対象を事前に定めずにまず検出をし、そこから検出物質を同定していく方法にも使用することができる。今回は主に後者のノンターゲット分析について紹介する。

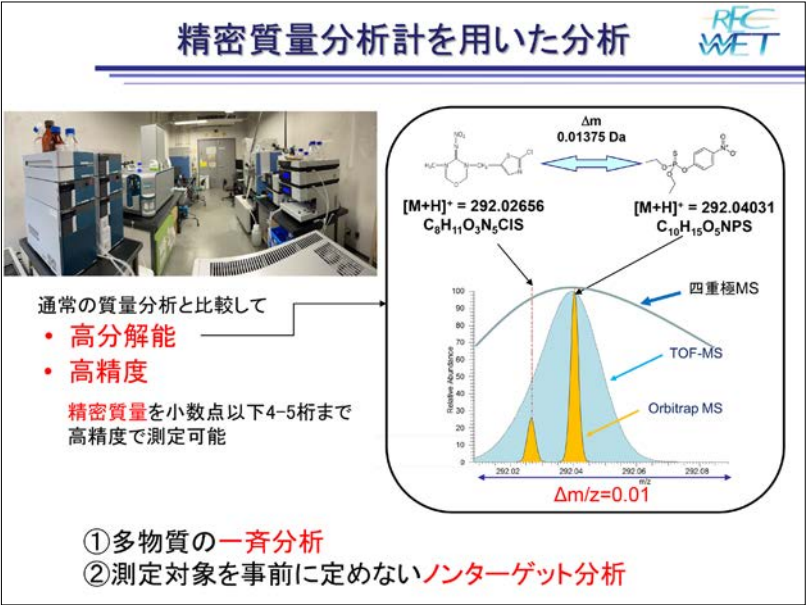


図 3-2-3 精密質量分析計を用いた分析

例として図3-2-4に、河川水を採取し簡単な前処理を行い、精密質量分析をして得られた生データを示す。横軸は m/z で示され、ほぼ分子量に相当するとみなすことができる。 m/z 150～200の間にほぼ分子量1ずつの間隔でピークが現れる。本分析の信頼できる有効数字は小数点以下4桁程度である。各原子の質量は少数点以下まで求められているので、計算機を活用してその組み合わせを考えることによって、分子式の推定が可能となる。このように、精密質量分析により、河川水に溶存する物質を把握することができる。ただし、同じ分子式を持っていたとしても、構造異性体の特定はできないため、ターゲットを決定した後に、次のステップとして構造推定が必要になる。

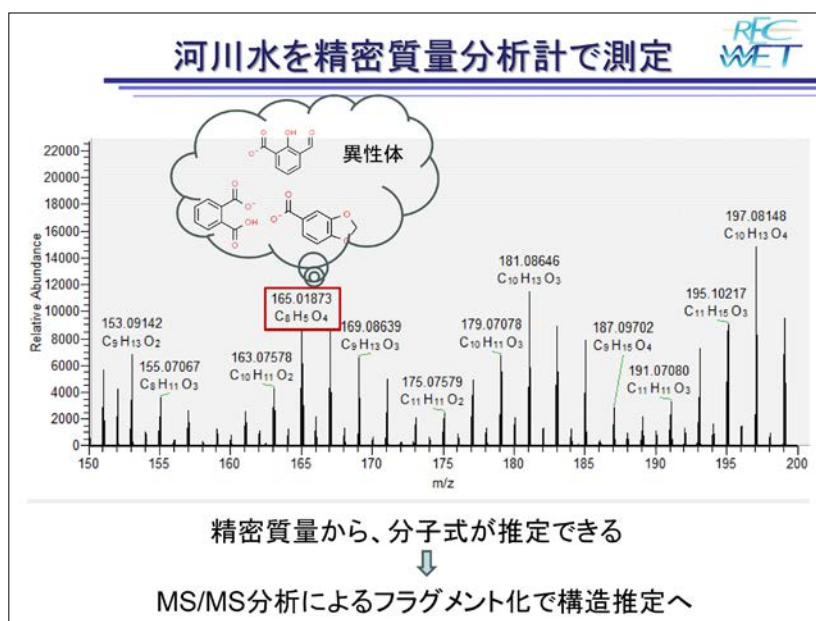


図3-2-4 精密質量分析計による河川水測定

続いて、埼玉県の入間川での調査事例について紹介する。入間川は、荒川の支流の最上流から飯能市を経由して、入間市、狭山市へ流れていく（図3-2-5）。地点R1-R4で採水し、分析を行った。なお、地点Nは飯能市の下水処理場が放流している地点である。その下流にある地点R4の直下で入間市の浄水場が取水している。

図3-2-6に各地点での分析結果を示す。最上流の地点R1では約300物質が検出された。地点R1で採取した試料は人為的な影響を受けていないと考えられる河川水であり、自然由来の物質であると判断できる。下流の地点R2、R3で同じ物質が検出されたものを、棒グラフの白色で示している。棒グラフの全体の高さは、各地点で検出された物質の数である。地点R3とR4の間には下水処理場の流入があり、下水処理水から検出された物質を赤で示している。地点R3からR4の間で多くの下水処理水由来物質の流入が検出された。地点R4のすぐ下流で浄水場が取水していることから、浄水場の原水も地点R4と同じだけの物質数が検出されている。図3-2-6の右側の棒グラフが浄水処理後の分析結果であり、浄水に残っている物質が示されている。



図 3-2-5 入間川(埼玉県)での調査

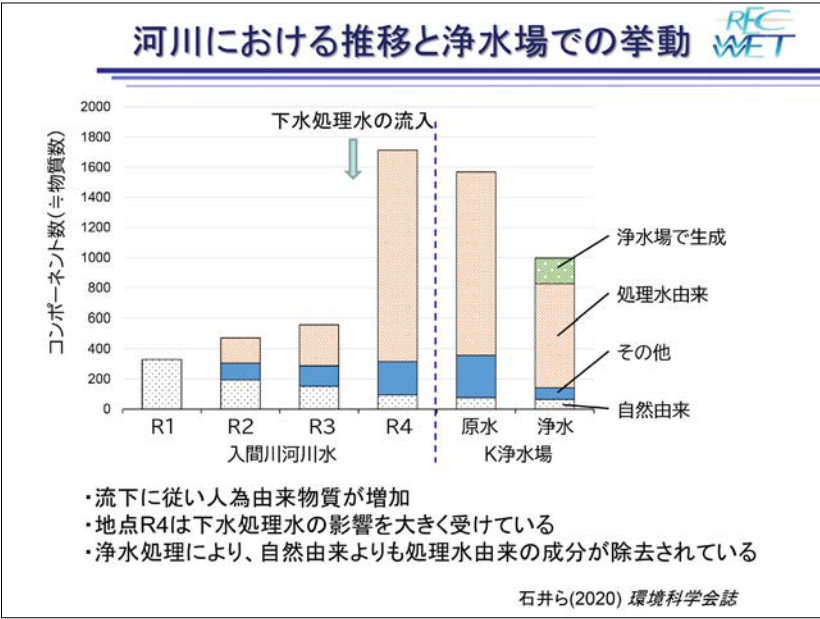


図 3-2-6 河川における推移と浄水場での挙動

さらに、浄水に残留した物質の具体的な種類を分析した。ここでは、元々の原水に含まれた物質のうち、最終的に浄水まで残留した物質の一部を推定した。詳しい方法は後述するが、特に界面活性剤もしくは分解産物に由来すると思われる物質が幾つか検出された(図 3-2-7)。

推定された浄水残留物質				
処理水由来物質のうち、浄水中からも検出された物質の一例				
検出分子量	推定分子式	質量誤差(ppm)	物質の候補	一致度*
266.1537	C ₁₂ H ₂₆ O ₄ S	0.41	Dodecyl sulfate	2/4
272.0686	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	0.40	Naringenin	1/9
300.1023	C ₁₄ H ₂₀ O ₅ S	2.70	8-(4-Sulfophenyl) octanoic acid	4/12
326.1910	C ₁₈ H ₃₀ O ₃ S	1.87	4-Dodecylbenzenesulfonic acid	2/4
328.1337	C ₁₆ H ₂₄ O ₅ S	2.19	10-(4-Sulfophenyl) decanoic acid	3/5

* (合致した第一世代フラグメントイオンピーク数) / (mzCloud中に記載されている第一世代フラグメントイオンピーク数)

□ Dodecyl Sulfate

界面活性剤であり洗剤に使用される

CCCCCCCCCCCCCCCCOS(=O)(=O)[O-]

□ Naringenin

トマトやオレンジに存在し医薬品としても使われる(ただし一致度低い)

□ 8-(4-Sulfophenyl) octanoic acid, 10-(4-Sulfophenyl) decanoic acid

直鎖アルキルベンゼンスルホン酸(LAS)の分解産物

Sulfophenyl carboxylic acid (SPC) 型²²⁾

OC(=O)CCCCCCCCc1ccc(S(=O)(=O)(O)O)cc1

□ 4-Dodecylbenzenesulfonic acid

LASの一種

CCCCCCCCCCCCCc1ccc(S(=O)(=O)(O)O)cc1

石井ら(2020) 環境科学会誌

図3-2-7 推定された浄水残留物質

続いて、同様の方法を下水処理を対象に実施した事例を紹介する。図3-2-8に示すように、9カ所の下水処理場から、沈殿処理のみを行った水、生物処理を行った後の水、塩素消毒を行った後の水を3回採取し分析を行った。

分析の結果を図3-2-9に示す。グラフ左側の緑色の箱ひげ図は、沈殿処理のみ行った水（初沈越流水）に含まれた物質である。これに対し、生物処理を行った後の二次処理水では、緑色で示す成分の多くが除去されている。これは好ましい結果であるが、一方で、青色の箱ひげ図で示す物質が生物処理を行うことによって生成している。最後に塩素消毒を行うと、塩素消毒によって塩素が付加されることでオレンジ色の箱ひげ図で示す物質が生成される。このように、下水処理の各プロセスによる物質の消長を追うことができる。

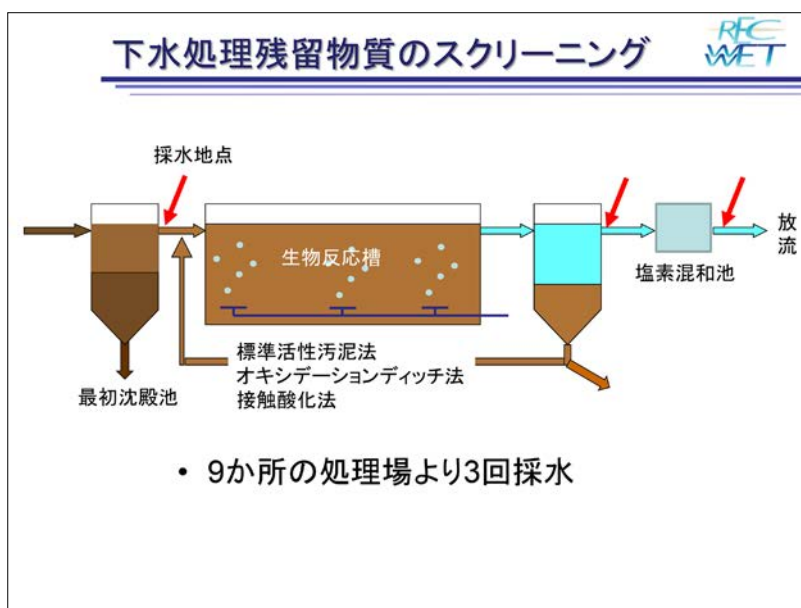


図3-2-8 下水処理残留物質のスクリーニング

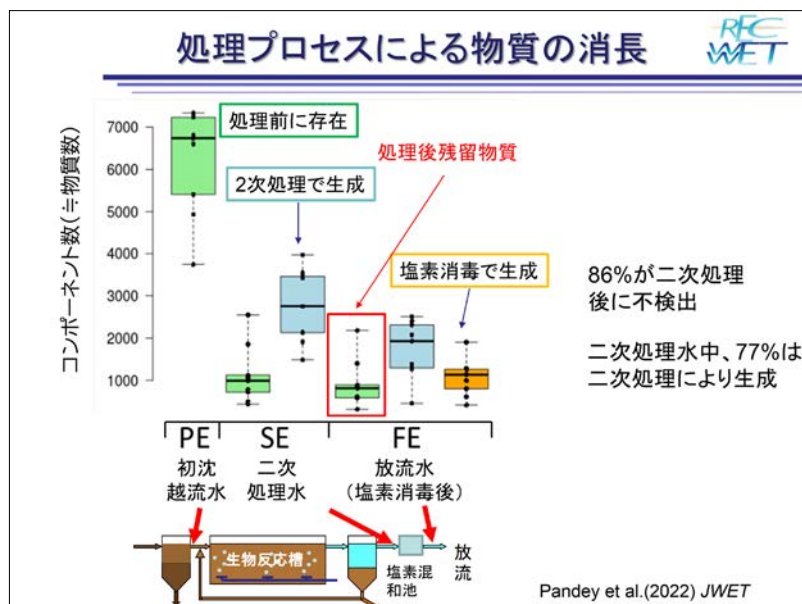


図3-2-9 下水処理プロセスによる物質の消長

続いて、元々の下水に含まれ、最後の処理水まで残留した物質の分析を行った（図3-2-10）。多くの下水処理場で複数の採水回で残留が見られた物質を対象に、検出強度の強い物質を100個抽出し、その100個について分子推定を試みた。対象物質に対して1回の質量分析だけではなくMS/MS分析を行い、フラグメントのパターンから物質の構造を推定した。

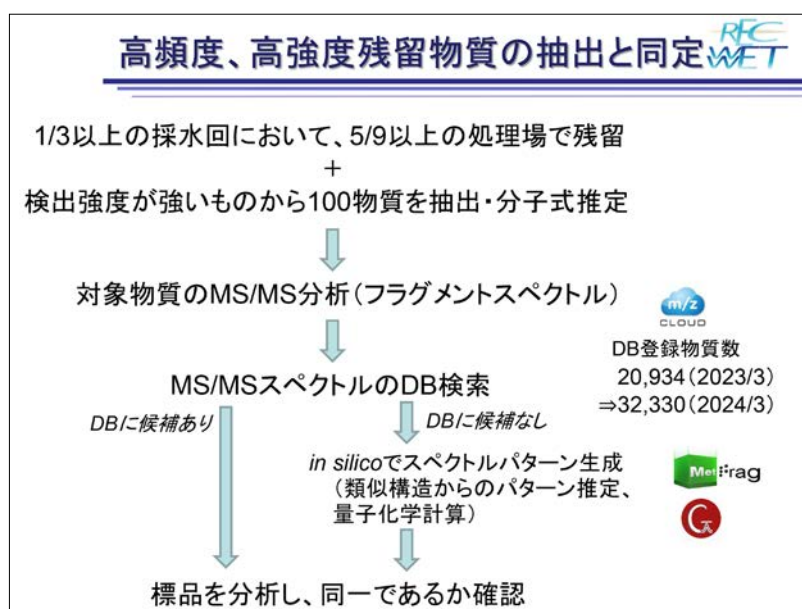


図3-2-10 高頻度、高強度残留物質の抽出と同定

ガスクロマトグラフ質量分析と異なり、液体クロマトグラフ質量分析においては、MS/MSスペクトルの機種依存性が高く、データベースの整備が進んでいない。今回用いた機種特有のデータベースには現在約3万物質が登録されており、登録情報と突き合わせを行った。更に、DBに候補がない場合は、実際に*in silico*

でスペクトルパターンを生成させたり、量子化学的な構造計算を行いスペクトルパターンを推定し、できる限りの物質の推定にトライした。最終的には購入した標品と比較し、同一か確認して答え合わせをした。

図3-2-11にうまくいったパターンを示している。上に分析データ、下にデータベースのパターンを並べている。ここから同じようなパターンが得られた物質が同定できるので、実際に標品を購入し、標品と同じように検出できるか確認した。今回の分析では100物質を対象としたが、最終的に同定できたのが図3-2-12に示す5物質である。このうち4物質は抗ヒスタミン剤等の薬に関係する物質であり、ほとんどのサンプルから検出された。今回の測定では、事前に測定対象物質を決めることなく、検出されたデータを見ながら構造を推定し、最終的にこの物質だということを確認するという手法でモニタリングを行った。そのようなことに現在チャレンジをしているところである。

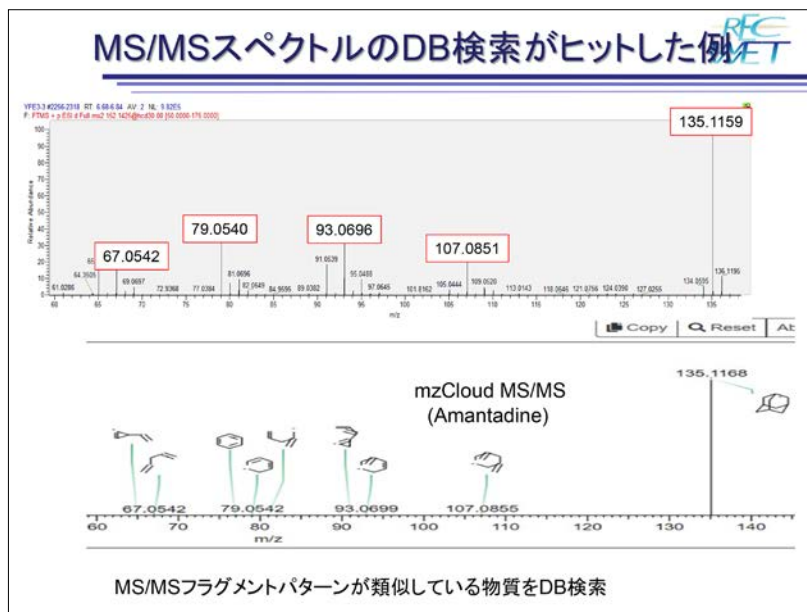


図3-2-11 MS/MSスペクトルのDB検索がヒットした例

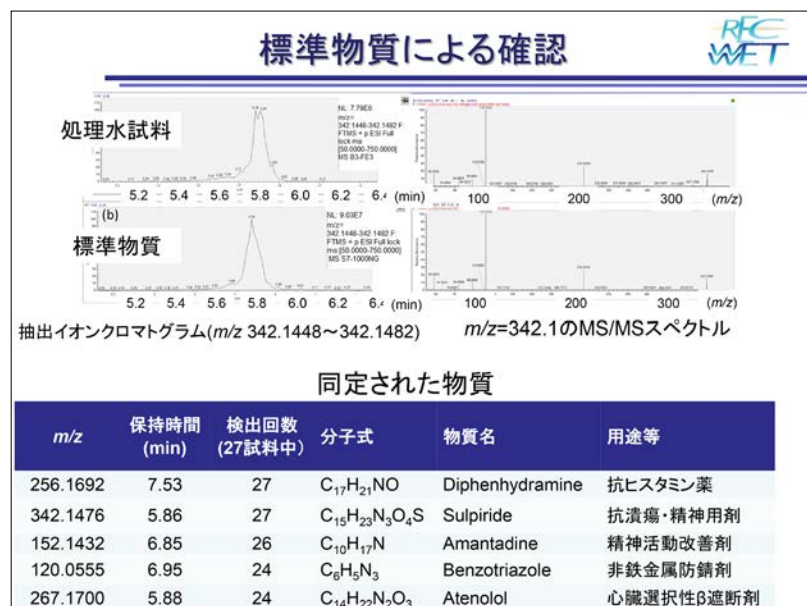


図3-2-12 標準物質による確認

更に、これらの物質が実際に環境中で問題があるかを評価した。生態影響があるかどうかの基準となる濃度としてPNECがあり、PNECと比較してその基準値を超えるかを評価した結果を図3-2-13に示す。特に×印で示すジフェンヒドラミンの放流水中濃度がPNEC比0.1に近い範囲で高濃度に検出された。従って、今回対象とした5物質の中ではジフェンヒドラミンの優先度が高く、より詳しいモニタリングが必要であるというようにスクリーニングを行うことができる。

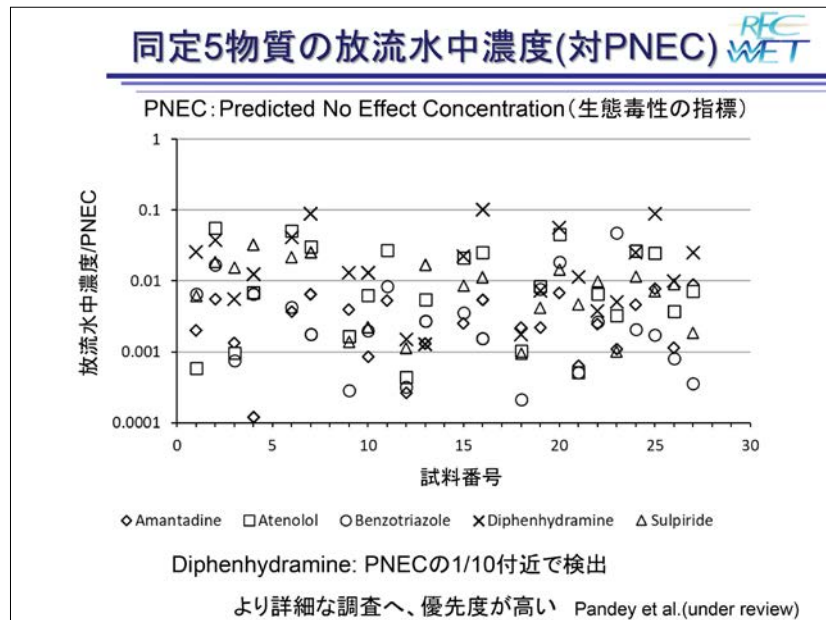


図3-2-13 同定5物質の放流水中濃度（対PNEC）

このような水質モニタリングに関し、現在ヨーロッパでは、国際河川であるライン川をフィールドとしたパイロットスケールの研究プロジェクト「Pilot project on non-target screening」が実施されている。このプロジェクトは各国が資金を拠出して進められており、ライン川から採取した水を先述のように分析し、何か問題が起きていないのかモニタリングを行うものである。

国内でも複数の研究者が現在研究を進めており、環境研究総合推進費では、「連続監視と網羅分析による水質事故の検知・対策手法の開発と流域モニタリングの最適化」(国立保健医療科学院 小坂浩司先生)、「データ非依存型取得法による環境汚染物質の定量デジタルアーカイブ手法の開発」(国立環境研究所 中島大介先生)などのプロジェクトが並行して進められているところである。

最後にまとめると、近年非常に多種類の物質が使用されている状況において、精密質量分析計を用いた網羅的なスクリーニング手法は、事前に測定対象物質を特定することなく様々な物質を包括的に分析し、詳細なモニタリングが必要な物質を絞り混むことが可能になる。より高度な水質管理を目指し、今後更なる技術開発を進めていく必要があると考える。

3.3 水圏機能材料の分子モデリング

鷲津仁志（兵庫県立大学）

私どもの兵庫県立大学神戸情報科学キャンパスは神戸のポートアイランドにあり、京コンピュータと富岳コンピュータに隣接している。私自身は理学から始まったがその後15年ほど自動車関係の研究所においてエンジニアリングに移行してきた。最近ではコンピュータを使った水の研究をしており、東京大学の加藤隆史先生が領域代表の新学術領域研究「水圏機能材料：環境に調和・応答するマテリアル構築学の創成」にシミュレーションの立場から参画している。この研究領域については、本来は加藤先生から大所高所からご説明いただくのがふさわしいと思うが、私が理解している範囲で紹介をしたい。

そもそも水と材料、マテリアルエンジニアリングというのはあまり相性が良くない。例えば携帯電話を水に落とすと使えなくなるし、有機合成は非常に水を嫌うものだ。しかし、それを裏返しにして積極的に水を活用していこうというのが本研究領域のコンセプトである。例えば、医用材料として使われるステントや、メカノ機能材料といって水環境で接着・脱離するような材料など、水の活用によって機能性を発揮する材料「水圏機能材料」の開発を目指している。水圏機能材料の開発により、例えばステントの中に電子デバイスを組み込んで、健康状態の経時的なモニタリングを*in-situ*（その場）で行えるようになるといった可能性がある。

具体的な研究例を2つ示したい。分子動力学法では、 $F=ma$ というある原子についての運動方程式を解くにあたり、その原子に関わる力場について、結合性であればC-C、C-H、かつ水の場合は原子の上にある電荷との相互作用を考えることで計算をしていく（図3-3-1）。一見単純に思えるが、水の場合は非常に小さい分子の中に電荷が多く偏っているという特殊な環境の考慮が必要になるため面倒である。

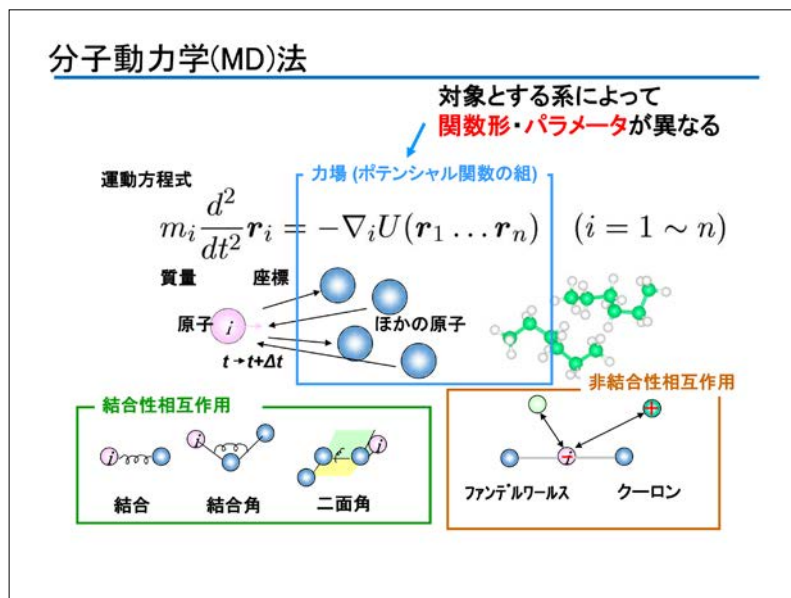


図3-3-1 分子動力学（MD）法

材料中の水を考えてみる。材料には、加藤研究室で研究されているイオン液晶分子の自己組織化で形成された膜を考える。この膜に環境水などを通すと、イオンを選択的に通したり、あるいはウイルスを通さないといった機能を示すため、水の浄化に利用することができる。こうした材料を高精度で設計できるが、自己組織化するためその構造は非常に複雑である。膜を構成するイオン液晶分子は、ガス中であれば強電解質として

正味の電荷が+1となっている。しかし、材料の中に水が存在する状況では、電荷の一部が染み出してより小さい値になる。その部分電荷を計算でも上手く扱う必要がある。我々は量子力学に基づいて分子動力学計算をiterativeに計算していく手法を開発し、その部分電荷がおよそ0.8程度であることを見出した。さらに、この値を使って大規模分子の計算をすることで、自己組織化によるカラム状の構造や三次元的な空洞を持っている構造の形成を予測できることを示した。

こうして求められた材料構造に対して、水の濃度をどんどんと上げてみる。すると、材料で作られたチャネル構造の中に、様々な状態の水分子が存在していることが分かった：チャネル内で孤立しているもの（solitary state）、液晶分子の集まった疎水領域にあるもの（hydrophobic state）、チャネル表面に結合しているもの（interfacial state）、水分子だけで集まっているもの（bulk-like state）である（図3-3-2）。これら4つの水分子の状態をエネルギーの観点で見ると、水濃度が低いうちは、チャネル表面と水分子が結合している状態（interfacial state）が最も安定であるが、徐々に水濃度を高めていくとバルク状態の水（bulk-like state）の方が安定になっていくことが分かった。そのほか、水分子の運動の分析も行っている。このようにして、材料の中には様々な状態の水分子が存在しており、それらを熱力学的に分類できるということを分子動力学シミュレーションを用いて明らかにしてきた。

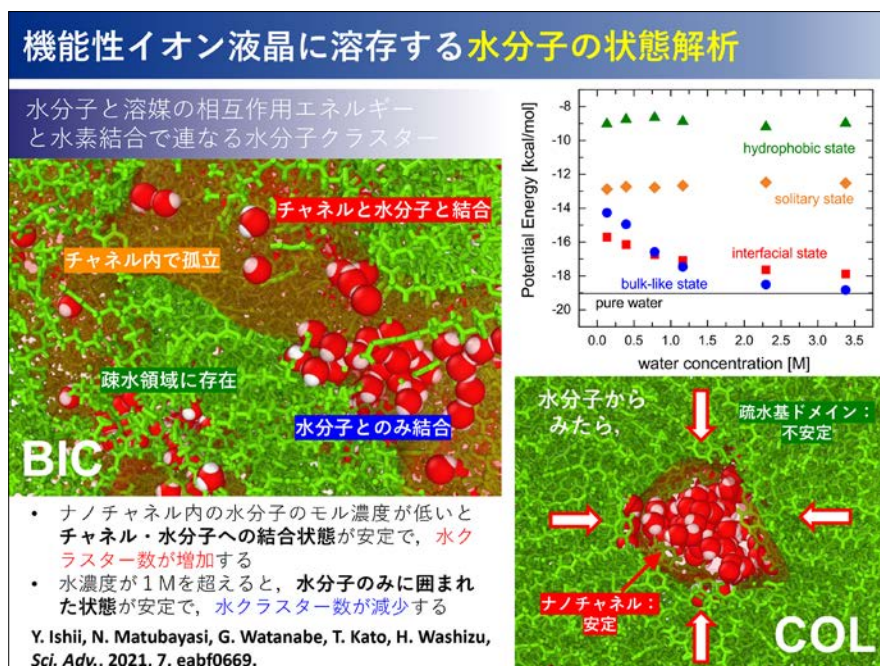


図3-3-2 機能性イオン液晶に溶存する水分子の状態解析

もう1つの研究例は、九州大学の田中賢先生が開発されている生体親和性高分子についてである。具体的には、poly (2-methoxyethyl acrylate) (PMEA) という材料であり、例えばECMO（体外式膜型人工肺）やステントなど、血液に接触して使われる機器や部材のコーティング材料として利用される。この材料と生体成分の相互作用に関して田中先生が提唱されているのが、中間水というコンセプトである（図3-3-3）。詳細は省略するが、この中間水と言える状態の水が材料と生体成分の界面に形成されると、血中成分（タンパク質や細胞）の固着を防ぐことが出来る、ということだ。この中間水の正体を明らかにしようと、この研究領域の中で実験とシミュレーションを組み合わせ取り組んだ。分子動力学で高分子の高次構造の大規模計算をすると、所々に水分子が存在していることが分かる。この水分子の状態を調べるため、共同研究者の静岡大学の鳥居先生がDFT（密度汎関数理論）計算を行った。量子力学的な状態を考慮するDFTでは、ある分子

が感じている電場の情報を分子の振動数として取り出し、赤外吸収スペクトルとして表すことができる。これを分子動力学の結果にマッピングし、実測の赤外吸収スペクトルと比較することで、半定性的/定量的な解析が可能になる。こうして、高分子材料における中間水というコンセプトをより詳細に提示できるということが分かってきた。

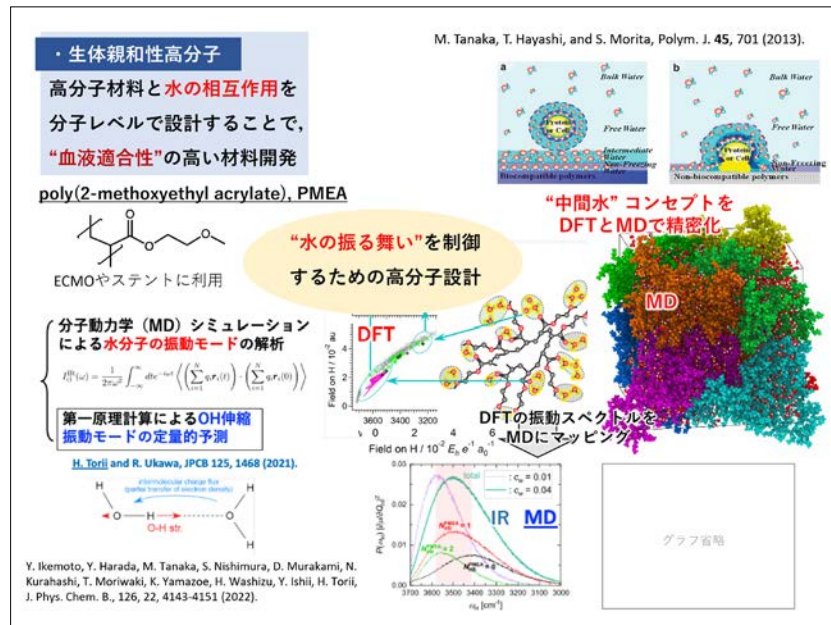


図3-3-3 生体親和性高分子における“中間水”コンセプト

ここまで、分子力学を使った水分子の解析事例について見てきた。ここで、ミクロな視点からマクロな視点に退いてみる。すると、マクロな材料と同時に、水分子が「流れ」として見えてくる。材料中の水分子を我々はブラウン粒子と呼んでいるが、ブラウン粒子の運動は詳細に計算しつつも、大きな水の流れはNavier-Stokes方程式をBoltzmann法で、また溶解している高分子などにはブラウン力学を適用する、という計算方法を我々は考案した。

一つの事例を示す。極性を持った高分子と非極性の高分子が、水の流れの中でそれぞれどのような構造をとるか、というものだ(図3-3-4)。図3-3-4の画像中では速度場の大きさを白黒の濃淡で表現している。面白いことに、速度が速い場合は単純に流れていくだけだが、速度が遅いときには非常に複雑な流動場が形成されることが分かった。このような現象は工学的には非常に重要である。例えば、自動車に必要な電池のスラリーや半導体を作製する際も、水に溶解したものの計算が必要になる。また、バイオ応用では、血栓ができる初期過程のシミュレーションに適用している。血漿中のタンパク質(VWF: Von Willebrand Factor)が動脈・静脈それぞれの流れの中で取り得る構造を計算すると、流れの遅い静脈内では丸まった構造を取るために切断酵素の結合サイトが露出せず、VWFを介した血管内皮への血小板の結合・蓄積が進んで血栓が起る、ということが分かった。このように水の流れと材料の構造がカップリングした現象を、我々は流れの中のフォールディングと呼んでいる。

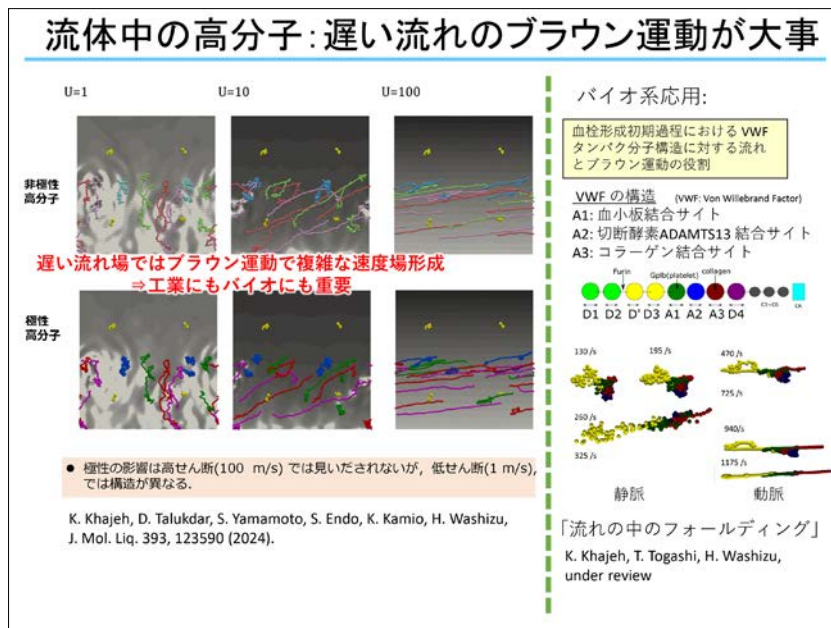


図 3-3-4 流体中の高分子：遅い流れのブラウン運動が大事

最後に、PFAS 関係の話題を提供したい。PFAS は、炭素の長さ（C7, C8 など）や構造の異なるものそれぞれに対して環境基準が決まっている。PFAS を水と比較してみると、C-F の双極子モーメントをたくさん持った塊とみることが出来る。京都大学の長谷川健先生が提案された Stratified Dipole-Arrays (SDA) モデルは、分子間の双極子が並ぶことでどのような凝集構造をとるか、理論的な予測を可能にするものである（図 3-3-5）。そして、撥水・撥油性、あるいは低誘電率といった性質の解釈につなげることができる。また、水の上に置いた PFAS について分子動力学計算を行うと、SDA モデルの通り、フッ化炭素の数が 7 以上になると水の上で秩序ある集合体を形成し、6 以下で無秩序に散逸することが分かった。このように水とフッ化物の関係が分かると、より広範な材料や生体分子の相互作用の理解などに展開していくことが可能となる。

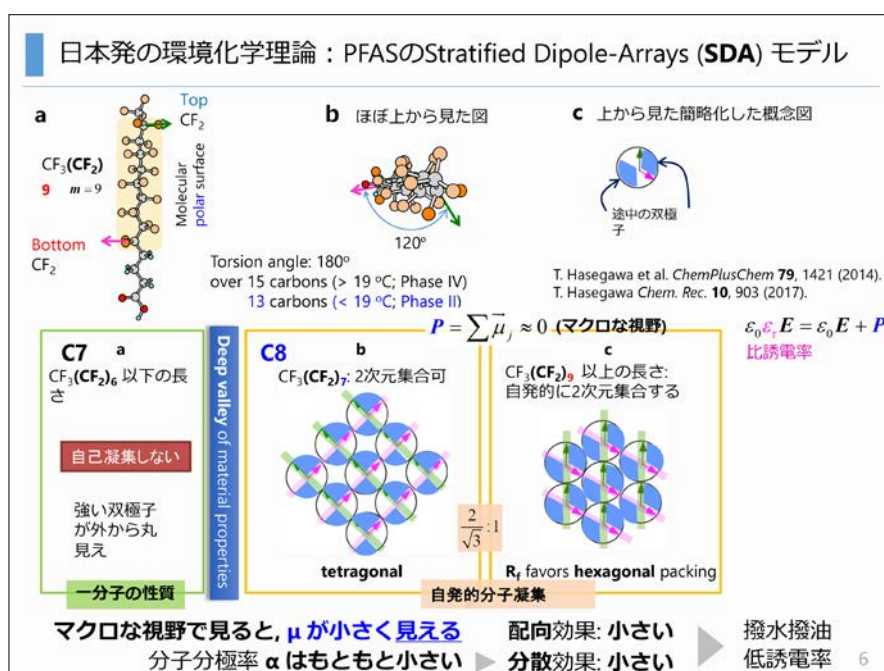


図 3-3-5 PFAS の Stratified Dipole-Arrays (SDA) モデル

3.4 水の動的濡れ現象の科学と工学

塩見淳一郎（東京大学）

今日は流体力学屋として水の動的な濡れ性についてお話しさせていただく。アメリカ物理学会では3セッションが平行で4日間行われるほどホットなテーマだが、日本ではあまり取り上げられない。日本もかつては水について独自の視点を持っていた。氷の結晶で有名な北海道大学の中谷宇吉郎先生がおられたし、そのご息女も霧をモチーフに芸術活動をされている。私も水滴の魅力にとらわれた一人だが、それだけでなくそこにはディープなサイエンスがあり、そして非常に有用な応用があると感じている。

図3-4-1の左上の動画¹¹は液滴が表面を濡れる様子を高速撮影したもので、動画を見て頂くと非線形な不思議な現象であると感じて頂けると思う。右上の動画はさらにミクロスケールで観察したときのもので、水滴の境界線である接触線でのミクロスケールの動きが見られる。ミリメートル、あるいはメートルのスケールの動きも遡れば分子スケールによって影響を受けている。

図3-4-1にまとめたように、水の現象を様々な観点で見ると、まずマクロな現象として濡れ広がり、滑り、ヒステリシス、蒸発、凝縮、凍結、霜などが挙げられ、流体力学的な観点では、流動、熱輸送、接触線、摩擦、相変化、外場への応答などが挙げられる。表面化学的な要素もあり、疎水性/親水性もしく、表面エネルギー、吸着、ナノ構造、化学修飾等による表面改質などが挙げられる。直接は接していない下地の材料も影響し、例えば柔らかさによって上の層での濡れの挙動が変わるということが起き、自己組織化材料、ポリマー材料、細孔、コロイド、分子運動論が関係してくる。

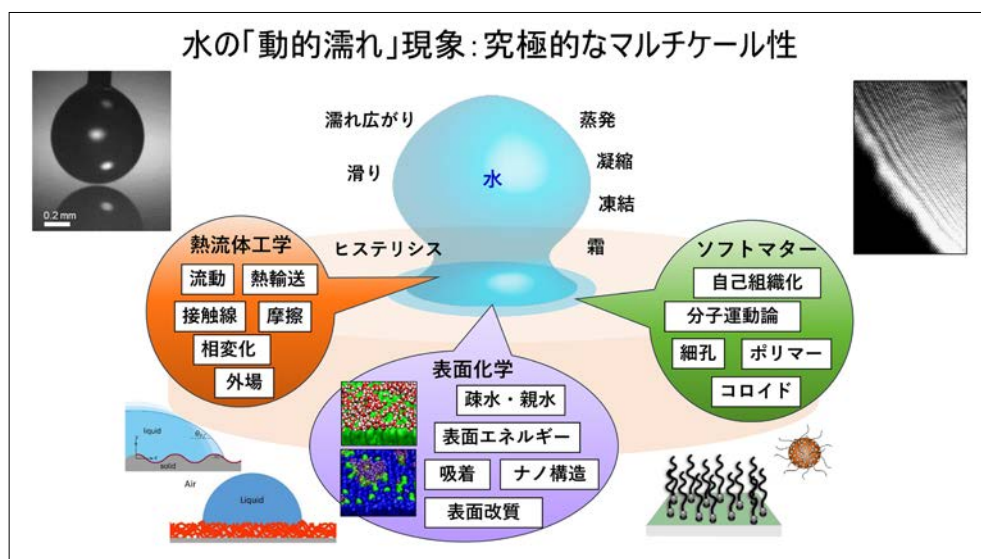


図 3-4-1 水の動的濡れ現象を支配する因子

応用としては、親水滑水、凝縮、凍結といった現象の利用が挙げられる。親水滑水はセルフクリーニング、すなわち水滴が窓に付いてもつるつると落ちてくれるというものである。また湿度の低いところでも水を採取し

¹¹ 東京大学 工学系研究科 総合研究機構 機械工学専攻 熱エネルギー工学研究室（塩見・李・浅野研究室）、
<https://www.phonon.t.u-tokyo.ac.jp/research/dynamic-wetting-control/>（2024年5月9日アクセス）

ようというニーズに対しては、そのためには水を自発的にどうコントロールするかという問題になり、そこでも滑水性が大事になってくる。凝縮については言うまでもなく、冷暖房や熱交換器で起きている現象である。凍結については、例えば飛行機の上の霜の成長によって通風抵抗が大きくなる。また寒冷地でEVに乗ると暖房が効きづらくなるのは、室外機に霜が付いてしまうためで、通常リバースサイクルを回して霜を落とすしか手立てがないが、凝縮が付かないあるいは霜が成長しない方法が確立できればメリットは大きく、実際いろいろな企業が取り組んでおられる。

当研究室での研究を紹介すると、図3-4-2の上段左は液滴が振動しながら左から右へすばやく移動するという現象である。これは単に慣性力で動いているということではなく、実は振動によって液滴が1回上に上がって再度基板に濡れる時に摩擦が生じ、この時表面構造によりその摩擦に異方性をもたせると水滴は一方方向に動くようになる。その速度は2cm/秒と結構速い。固有振動を使っているの、例えばバイオの実験で特定のサイズの液滴だけ動かしたい、取り出したい時は振動を与えるだけでよい、そういう表面ができるようになるということである。このような表面はスマートサーフェスとも呼ばれる。

図3-4-2の上段右は親水滑水で、塗料メーカーとの共同研究であるが、親水滑水に寄与する分子を混ぜてコーティングすると、接触角にして2度程度の非常に小さいヒステリシスを示す表面が作れる。そうすると、ちょっと傾斜をつけただけで水滴はつるつると滑っていく。撥水性で滑るものが多いが、親水性で接触角が低いにもかかわらずつるつると滑るというものができる。これについて現在、理研の二本柳先生らのグループとSFG（和周波発生分光法）解析を行っており、界面の水の特異的な構造に起因している可能性がある。

図3-4-2の下段左はソフト表面における凍結現象で、究極的には凍らない表面を目指したい。深海では深海魚が表面を凍らせずに生きている。不凍たんぱく質を分泌している、表面形状で巧みに熱力学を使って氷の成長の抑制をしているなどメカニズム解明が進められている。当研究室では表面をポリマーや自己組織化膜で化学的に修飾して、凍結現象が制御できるか検討している。これはマルチスケールに渡る課題で、凍結には核生成と成長という段階があるが、核生成を抑制しても成長が急激に進む場合もあり、氷の形を制御できるのは最初だけということになりがちである。最初の段階を制御して、次に成長のプロセスをどう制御するか、そういった課題である。

図3-4-2の下段右は遮熱性をもった塗料を作るために、遮熱効果を持ったメタマテリアルのフィルムを粉砕して顔料としてまぜる。膜をそのままロールtoロールで扱えればよいが、実用的には塗料の形にしたい。フィルムとして非常に良い光学特性を持っているものを粉砕して、塗ったらまた砕く前のフィルムの機能が再生するという、エントロピーを逆流させるような考えではある。粒々になったフィルムをもう一回ぴたりと向きをそろえるというのは確かに容易ではないが、塗料溶液の表面張力とその時間応答を利用するとある程度の性能までは引き出せることを見いだしている。



図 3-4-2 東大熱エネルギー研究室における水の動的濡れ現象の研究例

水の濡れ性の制御の一つの方法として外部電場や電荷を用いたエレクトロウエッティングという概念が知られている。基板と液体の間のキャパシタ効果により表面エネルギーおよび濡れ性の調整ができる。この方法を動的な濡れ性に適用したところ興味深い発見があった。図 3-4-3 は上 2 段が電圧を印加しない場合、下 2 段が電圧を印加した場合で、それぞれ平滑表面上とマイクロオーダーの凹凸を有する表面上で濡れの比較を行っている。表面に凹凸があると接触線が進みづらくなると直感的に理解できるが、そこに電圧を印加すると両方で液滴の形状変化に差が見られなくなる。すなわち電場を印加して表面に電気二重層が形成されると、液滴は表面形状を認識できなくなる。これは支配する物理が変わっていることを示しており、表面の摩擦に支配された物理から流体の粘性やバルキーな物性が表に出ることになる。新聞記事として取り上げられた際には、そういうことに使えるかもしれないという話として、電子基板をプリントする際に粗さが関係なくなるかもしれないと紹介された。

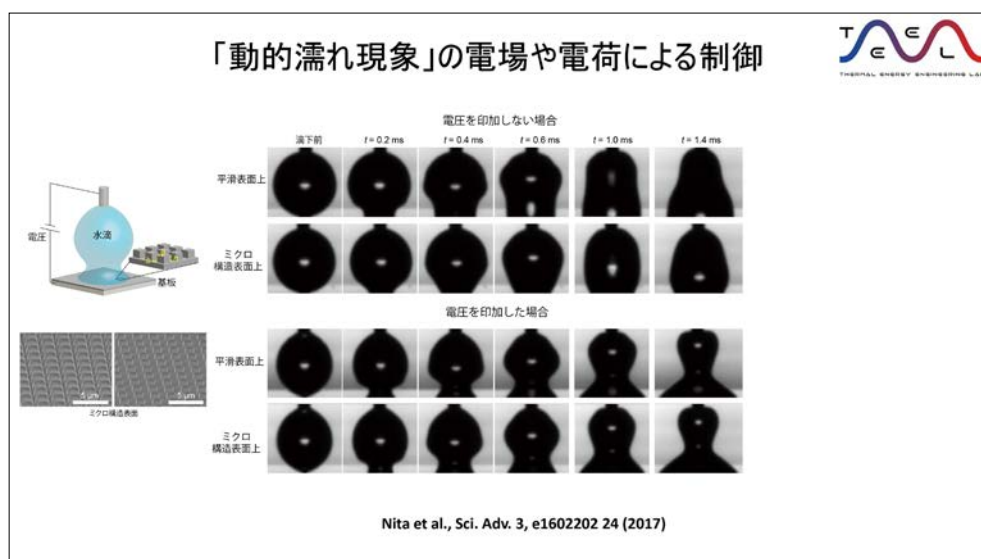


図 3-4-3 動的濡れ現象の電場による制御

東京大学の工学系研究科の若手の先生2名の研究を紹介する。機械工学専攻のムテルドゥ先生は、二次元の材料を一層一層積み上げて高さがオングストロームスケールの水のチャンネルを作り、その中に水を流して特異な輸送特性を見ている。グラファイトと六方晶窒化ホウ素は、結晶構造は同じで、かたや導体、かたや絶縁体であるが、その表面上を滑る水との摩擦力が両者で全く違う。マクロな水には見られなかった特徴がこのような小さなスケールでは見えるようになる¹²。

もう一つの研究は化学生命工学専攻の伊藤喜光先生が相田研究室に在籍中の成果で、内側がフッ素で覆われたリング状の材料を分子設計して、カーボンナノチューブを超え水の透過率が著しく高い材料の開発に成功している。フッ素の効果は単に撥水性を付与しているのではなく、水の水素結合を切って水のクラスター構造を不安定にさせているためと考えられている。今後高速の水処理膜への展開が期待される¹³。

最後にシミュレーションの取り組みについても触れておく（図3-4-4）。濡れ性を表現するために、2つのアプローチを検討している。一つは分子から出発して分子動力学法で計算を行っている。もう一つは拡散界面モデルといういわゆるフェーズフィールド法的一种であるが、非常に大きな計算を回して、実験と計算がぴったり合うところまでできている。界面の接触線の進展を表現するために、表面にマイクロスケールの突起があるように改造されていて、非常に大きなマルチスケールのシミュレーションも回せるようになってきている。

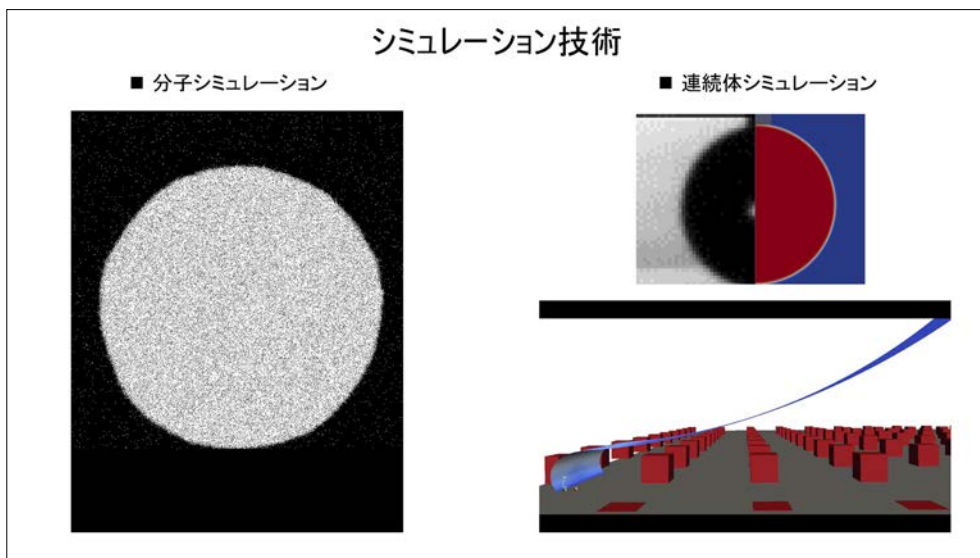


図 3-4-4 濡れのシミュレーション技術

¹² T. Mouterde *et al.*, Nature, 2019, vol. 567, 87–90

¹³ Itoh *et al.*, Science, 2022, vol. 376, 738–743

3.5 セッション討議

Q：質問、A：回答、C：関連意見・コメント等

【同位体比の捉え方について】

Q：同位体比をどのように捉えているのか。

A：基本的には常に環境中に一定の比率で含まれている酸素の同位体比を捉えている。水が蒸発する際に
かわる比率を重さで捉える。

Q：ここでは H_2^{18}O と HDO と H_2^{16}O だが H_2^{17}O は関係ないか。

A：関係ある。最近 ^{17}O も測ることが可能になってきている。

Q： H_2^{17}O と HDO は質量数としては同じになるのではないか。

A：分子特性が異なるので分別できる。質量数は一緒だとしても物性が異なる。HとOを別々に測るので
そこで分別できる。

Q：質量による運動のずれは加味されているか。それが追従できないように思うが。

A：水の大循環はかなりバルクな計算であり、何パーミルの非常に小さい違いは水としての挙動は一緒で
あると捉えて計算している。

Q：質量比による遅れは生じないとしている点は心配である。原子ラベリングは区別が付いて非常に面白く
私も使っているが、大気循環の時にどうしても質量差があるので、そのずれを補正しないと、もう一
つ精度が上がらないのではないかという気がした。

A：地球科学分野で使う場合にはそこは無視しているが、応用をもっと細かい話にしていけるとそういったこ
とも問題になってくると思う。

【環境中で検出された医薬品成分について】

Q：処理水から複数の医薬品成分が見られたとの結果があったがこれは量が多かった順に並んでいるわけ
ではなく同定できたものを並べているのか。

A：今回はまず取りかかった中でできた100物質中の5物質の結果を示した。量的にどうだったかを言う
のは難しいが、27試料中で27回見られたものというのは、9の処理場で3回全部から検出できたとい
う意味では、頻度が非常に高かったと言えると思う。ただしこの辺は技術的な部分もある。分析上、
感度よく測りやすい物質と、感度が高くて測りにくい物質とがある。今回は感度よく測れた物質の中
での結果になってくるのでこれが濃度として一番高かった物質というわけでは必ずしもない。

【中間水について】

Q：中間水という考え方が非常に興味深かったがこれは何なのか。

A：不透水というのが材料の表面にあり、材料の影響を全く受けない自由水があり、中間水というのがそ
の間にあるというもの。熱測定で出てくるある特徴的なピークに基づいて、実験系の先生方が提唱され
ている。分子論的には曖昧な気がしており、これが何なのかを実験系の先生方と議論している。例え
ば官能基に直接結合した水とそこから離れた水では運動の様子が全く違うとか、そういったことが見え
てくる。それらを実験的にはテラヘルツ分光やIR（赤外分光）で分析しその結果をシミュレーションと
突き合わせるということをやっている。

Q：基本的には分子動力学（MD）で計算した時に表面にくっついていて水分子は自由水とは違う運動を
していて、それはリジットになる。これはMDで直ぐに、何の特異なことを入れなくても出てくる現象
である。それを称して中間水としているのか、あるいは区別しているのか。

A：MDの中だとどれぐらい水素結合しているか、運動性はどうかなどを含めてトータルで考える。

C：発表にあったように中間水は九州大学の田中賢先生が提案されている考えであるという点はちゃんと
 言っておく必要がある。水の場合は測り方によって色々ある。

【水分子の状態解析について】

Q：鷺津先生の水分子の状態解析の図で、横軸はwater concentrationがモルで表示されているのは、
 素材の中にどれだけ水があるかという意味の濃度だと理解した。要はそこに存在し得る水分子の数が
 多くなるとそれなりに安定化するが、少ないと非常に局所的な状態ができていると理解すれば良いか。

A：おっしゃるとおり。

Q：その時に、ハイドロフィリックの時のエネルギー、縦軸がポテンシャルエネルギーなので、その分子が
 持っているエネルギーが大きいかわからないという表示だが、そういったものがどれぐらいそこに存在し
 ているかという情報はないか。

A：ある。どれぐらい存在しているか、あるいは付いている分子が幾つぐらいのクラスターをつくっているか
 という情報は取れる。

Q：計算上できるということか。

A：全て論文の中で図に示している。まだらだったのが順番に連続体的になっていくという理屈である。

【ナノからマクロまでのスケールをつなぐ部分のサイエンスとしての課題】

Q：原子レベル、分子レベル、それからマクロにつながる場所の難しさ、サイエンスはどういったところ
 にあるのか。

A：何が決定的に問題かという、メゾスコピックな領域は見えないこと。10ナノメートル、100ナノメー
 トルスケールである程度のスピードで動く何かをしっかりと観察できる技術がない。分子動力学だけで
 は、ナノスケールで何かが起こる気がしない、もしくは起きるとしてもそれを制御できると想像できない。
 しかし説明したように現象の長さスケールは、やはり10ナノメートルとか100ナノメートルオーダーと
 考えざるを得ない。この領域は連続体として扱えない、扱おうとすれば少なくともモデルを入れ込む必
 要が出てくる。そしてその答え合わせをしたくても、そのスケールの動的な現象を捉える方法がないの
 が現状である。ただし世の中に何の取っかかりもないかという、固体や電気化学など別の分野に目
 を向けると同じように考えている人たちがいる。分野間で知識や人脈が繋がってないのは課題と思っ
 ている。

Q：水の誘電率は80と習うがあれはかなりバルクの量だと思う。これがどのくらい小さいところまで繋がっ
 ていくのか、あるいはタイムスケールがどの辺からおかしくなってくるか等はどこにもしっかり書いてお
 らず知りたいと思う。

A：誘電率がダイポールのダイナミクスだとすると、MDでチャンネルの幅を広げていって、どの辺で連続体
 ではなくなるか、バルキーではなくなるかとやっていくと意外に小さい。数ナノメートルとかである。し
 かし実験とあまり辻褄が合わなかったりする。計算のところに入ってない物理化学があるのかもしれない
 いし、実験の方でちゃんと測れていないかもしれない。しかしそれがどちらなのか分からないので、ま
 だそこはオープンクエスチョンではないか。

C：書かれてないとおっしゃったが、70年代以前の電気化学では、電気二重層や電極近傍の誘電率は中
 心的課題のひとつであり、ものすごく議論されていた。1920年代にはすでに強電場内での水の誘電率
 についての議論はあり、その後も活発に研究されており、電気化学の教科書には詳しく述べられている。
 もっとも、当時の理論（計算）は熱力学的なものだけであった。

C：MDとかではなく、高校の物理学程度で3オングストロームを仮定して、この位になっていくと例えば
 誘電率がこういうふうに変まっていく、1から80にどんどん上がっていくというようなプロセスをきちっ
 とプリミティブに理解することが大事なのではないかと思う。

- C：そのようなモデルは存在する。逆に言うと昔のほうがMDではなく熱力学計算だとかそういう簡単な力学モデルでどこまで計算できるのかという辺りをやっていた。今はそこがすぼっと抜けているような気がする。
- C：いきなりMDと言っても映像で見えてくるから漫画にだまされてしまうようなところがある。そういう辺りをきちっと把握しないといけないのではないかと思い、どうやったら80が説明できるかなと一生懸命考えたことがあるが、なかなかうまくいかなかった。
- C：この場合の実験で見れないという話はいわゆる電気化学的な意味で見れないと言ってるわけではなく、コンタクトライン（接触線）が見えないということを言っている。

4 | セッション2：わかる

4.1 フラックス法による水処理材料の開発と応用

手嶋勝弥（信州大学）

※出張先のアフリカ・タンザニアからの参加のため、事前録画した動画でのご発表

最初にフラックス法の原理を紹介する。これは、お湯の中で塩の結晶を育成するメカニズムと同じである。飽和状態の水溶液を作り、その後ゆっくりと冷やす、あるいは溶媒を蒸発させることで溶けていられなくなった塩が結晶となって析出する。溶解度を利用して結晶を作る方法がフラックス法である。図4-1-1は、擬二成分系共晶型の状態図である。重要な点は、結晶（成分A）とフラックス（溶媒、成分B）を混ぜることで、その共晶温度（ T_E ）がそれぞれの融点（ T_A や T_B ）よりもはるかに低くなることである。この原理を利用して共晶が晶出する。フラックス法の結晶育成方法はとてもシンプルで、電気炉などの熱源とるつぼなどの容器があればよい。

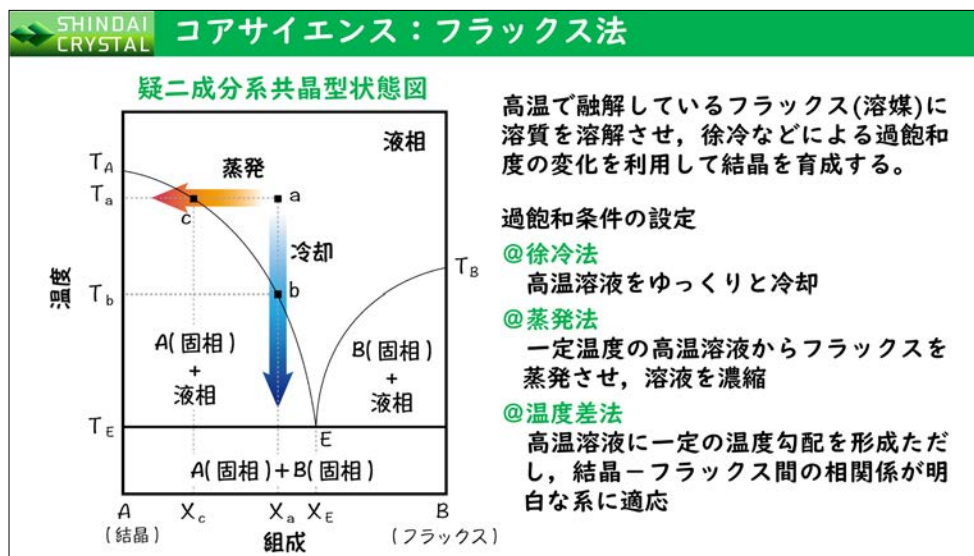


図 4-1-1 コアサイエンス：フラックス法

コア技術であるフラックス法を利用し、当研究室では図4-1-2に示すように蓄電デバイス、光触媒、イオン交換体、機能性無機材料の4つのテーマに取り組んでいる。ここでは「水をキレイにする化学」に資するイオン交換体結晶についてお話しする。無機結晶がもつナノの空間を利用して陽イオンや陰イオンの交換、吸着、分離をめざしている。



図 4-1-2 フラックス法を活用した当研究室の重点研究テーマ

固体内にナノ空間を持つ多孔質材料としては、活性炭、ゼオライト、MOF (Metal Organic Framework) などが挙げられるが、われわれは水を包含できる細孔として、粘土鉱物や層状金属酸化物に注目している。粘土鉱物の場合、イオンの水和能が材料の膨潤、剥離能を支配する¹⁴。層状金属酸化物では、主骨格とその水和状態が静電容量を支配する¹⁵。このような基本原理を利用して効率的なイオン交換材料を研究している。

まず陽イオン交換体結晶の開発について説明する。当研究室では、重金属イオン交換体結晶として層状チタン酸ナトリウム ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 、以下 NTO と略す) の育成に成功している。図 4-1-3 に顕微鏡写真を示すが、ミルフィーユ状の湾曲した層状結晶構造をしており、 Na^+ イオンが重金属イオンと交換し、水中に溶解している重金属を除去することが可能となる。

図 4-1-4 は、JIS 規格に基づいて評価した NTO のイオン交換特性である。種々の重金属イオンに対して高い除去率を示すことが確認されている。商用化にも成功し、国内の浄水器に搭載されている。また、後で述べるアフリカでの実証にも使用している。

14 M. L. Whittaker *et al.*, PNAS, 2019, 22052–22057

15 S. Boyd *et al.*, Nat. Mater., 2021, vol. 20, 1689–1694

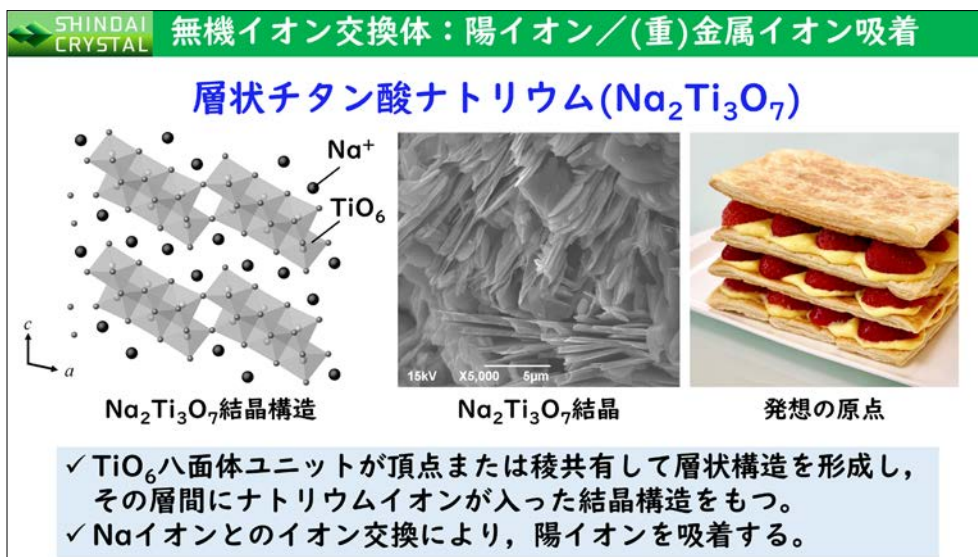


図 4-1-3 陽イオン交換体

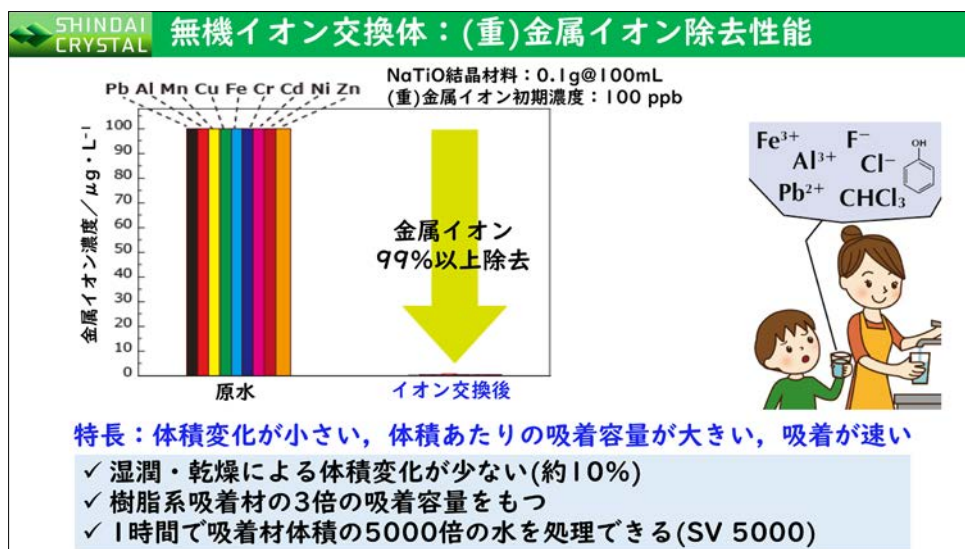


図 4-1-4 陽イオン交換体 NTO の特性：重金属イオン除去性能

次に図 4-1-5 に示す陰イオン交換体の層状複水酸化物 (LDH：Layered Double Hydroxide) について説明する。2 価と 3 価の金属の酸化物から成り、ホスト層をデザインすることで、フッ化物イオンなど多様な陰イオンを交換することが可能となる。ポイントは、ホストとゲストイオンの相互作用、およびプラスαの制御である。

例えば我々は低電荷密度層¹⁶や積層不整¹⁷の導入による柔軟な積層構造が吸着を促進することを明らかにしている。また準安定固溶体によるイオン-イオン立体相互作用の誘起¹⁸、高対称性配列によるイオン-水分子

¹⁶ T. Sudare *et al.*, Nat. Commun., 2022, vol. 13, 6448

¹⁷ T. Sudare *et al.*, J. Phys. Chem. Lett., 2023, vol. 14, 2, 584–591

¹⁸ T. Sudare *et al.*, Chem. Mater., 2022, vol. 34, 23, 10681–10690

の水素結合の安定化¹⁹を明らかにしている。これらの制御によりLDHの性能を向上させる結晶デザインを実現している。またこの材料を使ったアフリカ実証試験も実施している。

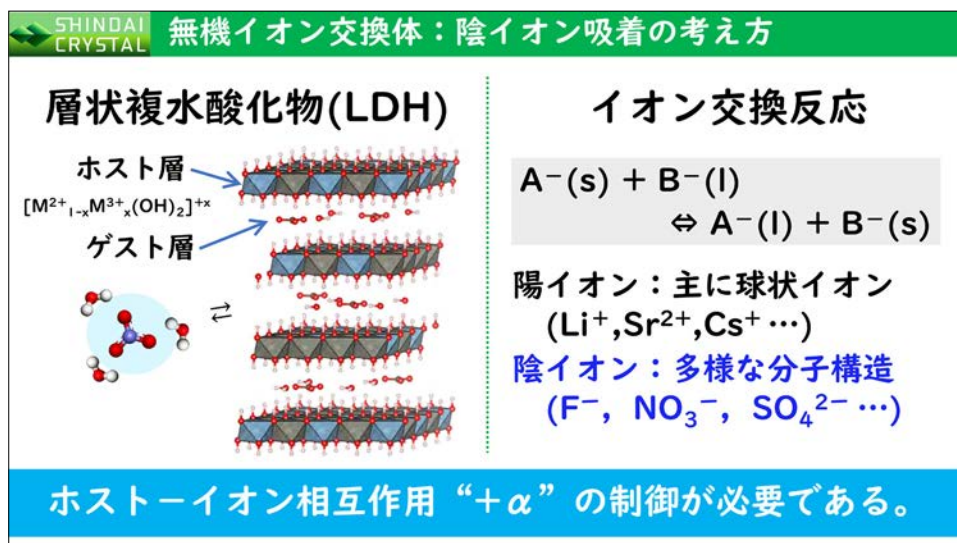


図 4-1-5 陰イオン交換体（層状複水酸化物）

アフリカでの実証試験を紹介する。タンザニアのレマンダ村はインフラから取り残された地域であり、この地の水をきれいにするソリューションを考えている。この地に適するソリューションとは何か？この地の飲用水には、土壌の成り立ちによってWHOの基準値1.5ppmの約20倍の濃度の多量のフッ素が溶け込んでいる。この水を飲用することによってここで暮らす人々には骨フッ素症など健康被害が生じている。このような国と地域がアフリカ大陸には多数存在している。

2023年1月、極めて簡便な緩速ろ過型の浄水プラントをレマンダ村に設置し、初めての蛇口を作った。タンクの中にNTOを投入し、鉛やカドミウムなどの重金属イオンを除去している。NTOは国際認証も取得しており、世界中で安全・安心に使用することが可能である。合わせてフッ化物イオン除去剤として層状複水酸化物（LDH）を試験的に投入している。こちらの材料は国際認証取得が可能かどうかを検討中であるが、現地の住民から大きな期待を集めている。

アフリカでの取り組みでは、社会インフラから取り残された人々が見えないリスクに対して安心・安全な水を使用できるようにすることを目指している。限られた多様な水源を使用できるようにし、水へのアクセス時間を短くし、不衛生な水で命を落とす子どもたちを減らしたいと考えている。汚れた水に加え細菌やウイルスへの対応も必要である。検出手段や除去できるデバイスを現地で導入できるコストで社会実装しなければならないというのがバックキャストから見てきた課題である（図4-1-6）。

現在のわれわれの取り組みは、国プロ（信州大学アクア・イノベーション拠点プログラム）だけでなく多様な企業に支えられて成立している。一期一会を大切に、皆さんと一緒にアクションを起こせればと思っている。

19 T. Sudare *et al.*, Adv. Mater. Interfaces, 2022, vol. 9, 2201484

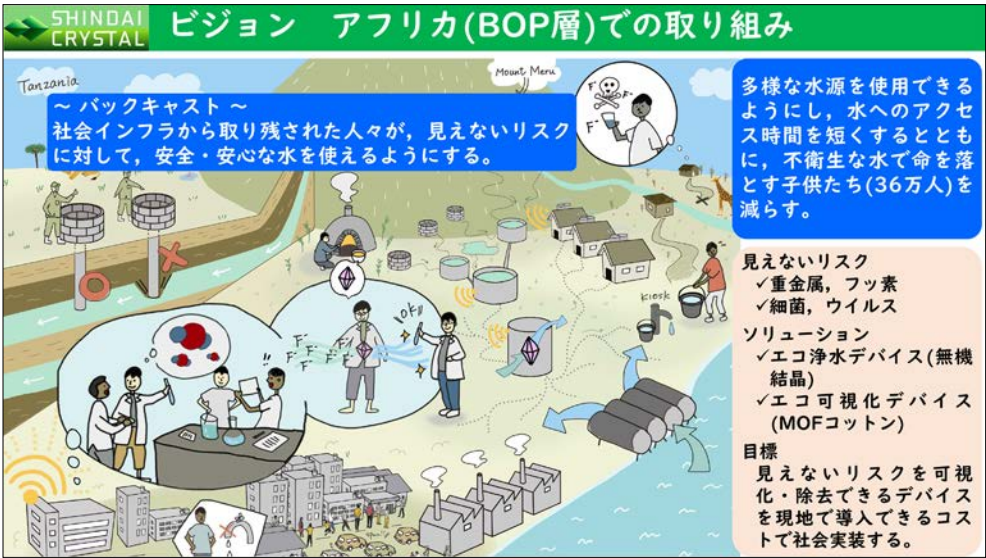


図 4-1-6 ビジョン アフリカでの取り組み

4.2 環境中のコロイドの理解・分離技術開発

足立泰久（筑波大学）

ここでは環境中のコロイドについてこれまで取り組んできたことを中心に話をしたい（図4-2-1）。水処理ではコロイド粒子を集めてフロックと呼ばれる塊にして分離する。そのフロックがバルキーな状態にあるのか、あるいは丸くなっていくのか、それはなぜなのかということを研究してきた。粘土やカオリナイトを使った先行研究があったが、それではよく理解できなかったので人工的な丸い粒子を使って調べ始めた。



図 4-2-1 環境中のコロイドの理解・分離技術開発

メートル、キロメートルスケールの物質輸送を考える時、ミリメートルスケールの凝集体ができるか否かが水質等に決定的に関わってくる。そのため凝集体がどういう形でできるか、どうしたら凝集するのか、しないのかの理解が重要になる（図4-2-2）。並べた2つの瓶のうち、左側が分散した状態、右側が凝集した状態である。凝集すると上澄みと沈殿に分離される。この境界を表す理論的枠組としてはDLVO理論があり非常に研究が進んでいるものの、実際にどのようなフロックができるかについてはこの理論だけではよく分からない。コロイドの粒子の表面には様々な化学物質が吸着して濃縮しているため、水に溶けない物質もコロイド表面に吸着する。そのためコロイドの挙動が水質の挙動そのものをほぼ決定していると言える。

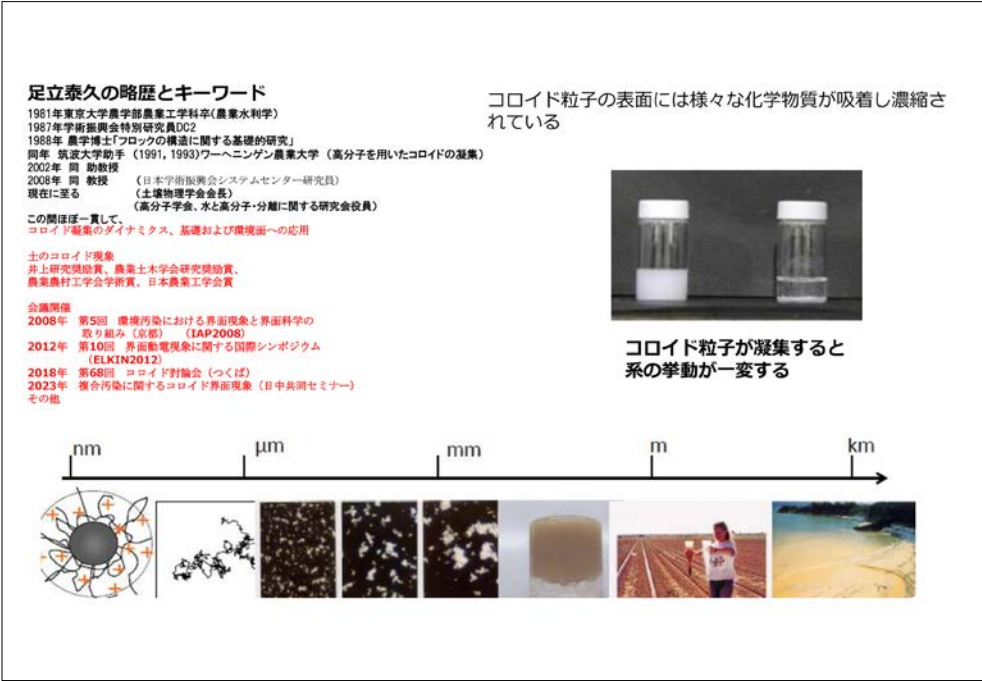


図 4-2-2 コロイド粒子の凝集と水質の関係

少しマクロに見ると、例えば土壌侵食ではコロイドが分散していると泥水になって全て流出するが、凝集していると土壌はその場に留まる。ダイオキシン類は水溶性ではないがコロイドに吸着するため、コロイドが動くか否かで土壌中のダイオキシン濃度が決まる。放射性同位体も同様である。かつて東京湾の塩分濃度が高くなると凝集し、その凝集した部分だけ急にセシウムの濃度が高くなる現象が確認されたとの報道があった。海洋中の有機物は炭素量自体は少ないものの物質輸送を考えるとときには懸濁態有機物が凝集すると沈降していくため、実際に動的なプロセスを決めているのは凝集、あるいはその後の沈殿ということになる。

リンは水に溶けにくいが河川水中のリンの濃度と固体（懸濁物質）の濃度はかなりよく相関していることが知られている²⁰。凝集するか分散するかが濃度決定に関与している左証である。また淡水と海水が混ざり合う汽水域部分で凝集がよく起き、生物生産性が非常に高くなることも知られている。これらより凝集が様々な現象に関与していることは間違いないと思われる。

環境中のコロイドは多種多様で不均一、多分散、非平衡な状態である。いきなりこれを対象にしても分からないので、考えのフレームワークをはっきりさせるためにナノ粒子を使用したフロックの形成過程、ナノ粒子の凝集挙動に着目して研究してきた。またその過程では研究内容が徐々にコロイド界面科学に移行していったところもある（図 4-2-3）。

20 小林幹佳ら, 土木学会論文集B1 (水工学), 2011, vol. 67, 4, I_1285-I_1290

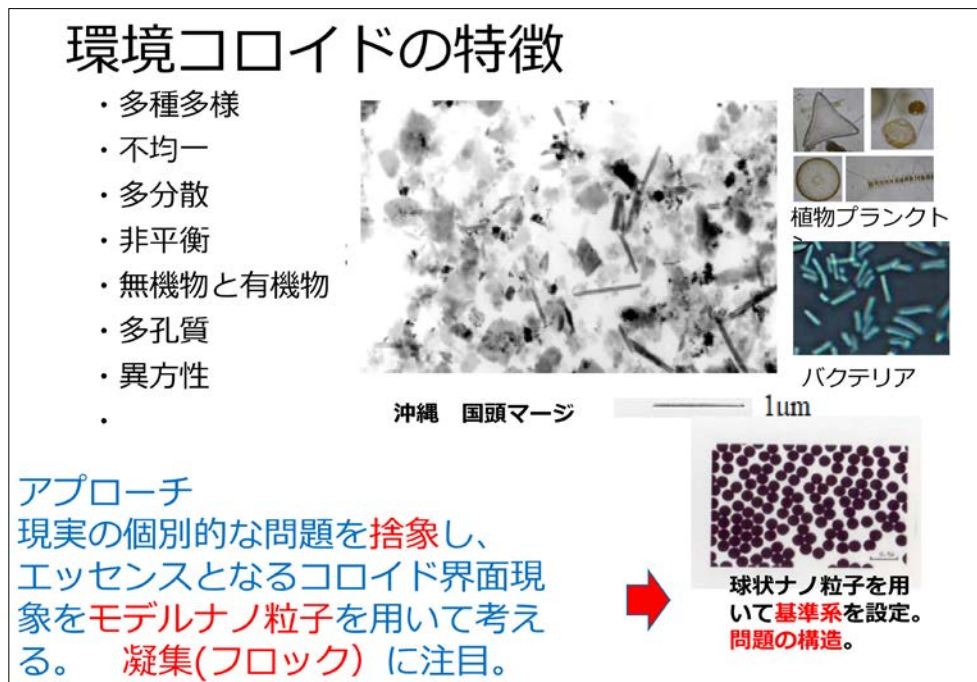


図 4-2-3 環境コロイドの特徴

図 4-2-4 は、系の構造の説明である。フロックの形成過程は流体力学的条件と表面化学的条件の組み合わせで決まり、これが決まると構造が決まる。構造が決まると、フロックの沈降速度、体積、強度、レオロジー特性が決まる。粒子の表面化学的特性は、DLVO 理論、電気二重層、ぬれ性などに依存している。このような枠組みに沿って色々な系を調べてきた。

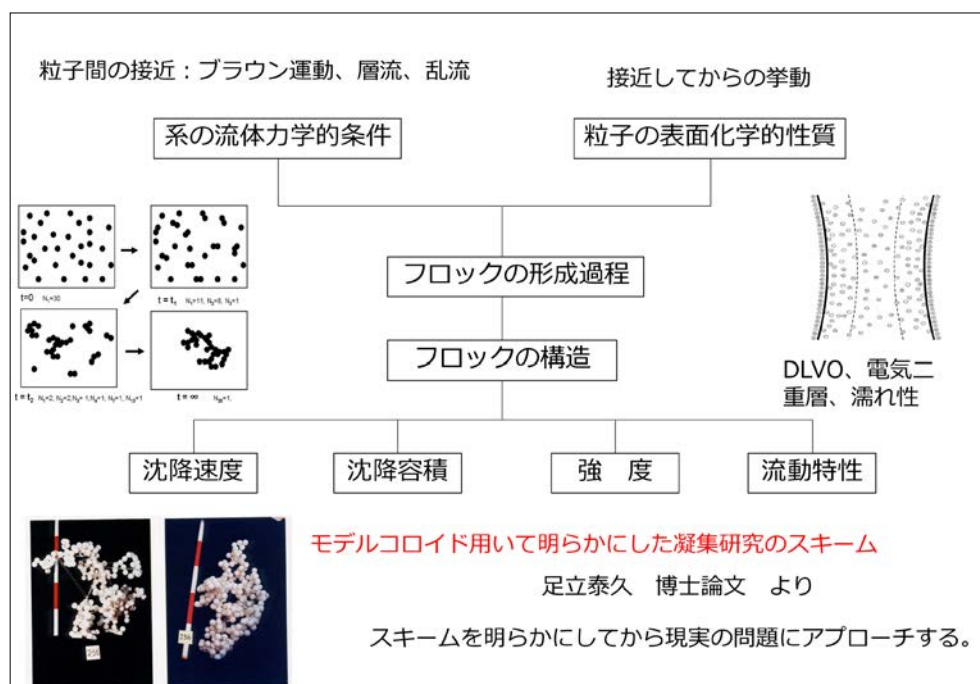


図 4-2-4 系の構造

そうした系を基にして、例えば科学研究費補助金（基礎研究S）では「フロクキュレーション解析に基づく環境界面工学の展開」と題して、凝集過程のダイナミクス、多孔質複合体の界面動電現象、フロク群の沈降・流動と乱流構造、濃厚系の分離特性、微生物フロクのグラニュール化などの研究を行い、またそれらをフィールドにおける水質土壌工学への応用にどう還元できるかを検討した（図4-2-5）。

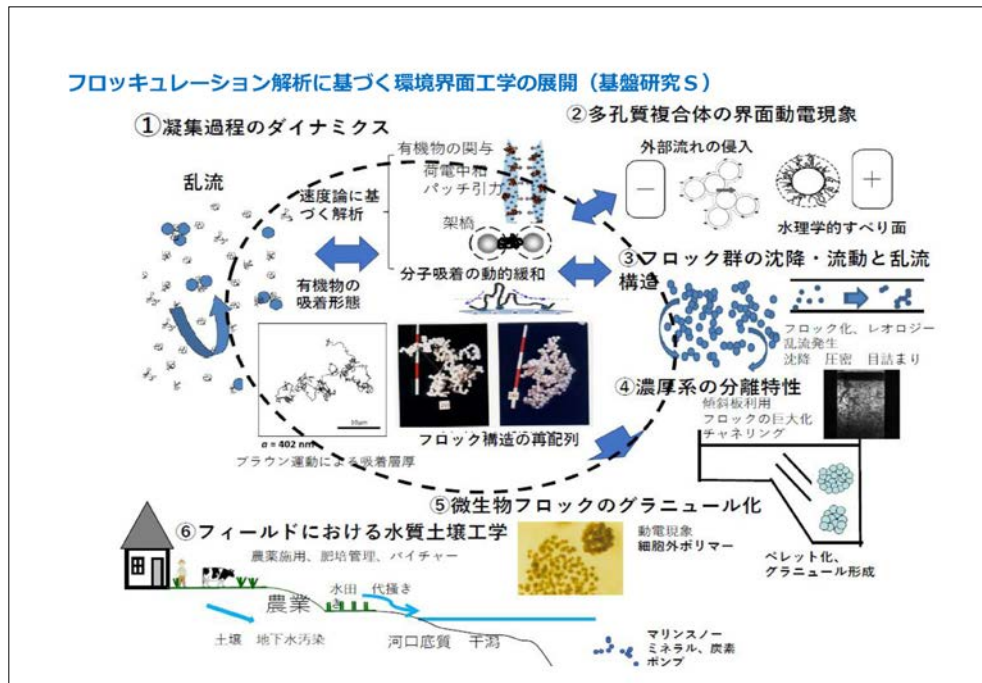


図 4-2-5 フロクキュレーション解析に基づく環境界面工学の展開

2008年に Interfaces Against Pollution（IAP2008）²¹ という4日間にわたる国際会議を主催した（図4-2-6）。東京理科大の大島広行先生にチェアマンをやっていただき、吸着現象や界面動電現象などに関するセッションを設定した。界面に注目することによって約30の学術団体から色々な分野の人が集まった国際会議となった。界面科学をどう応用につなげるかという議論もした。会議以降もサマースクールを続けている。

21 5th International Conference Interfaces Against Pollution、
<https://www.eng.bres.tsukuba.ac.jp/colloid/iap2008/en/index.html>（2024年5月9日アクセス）

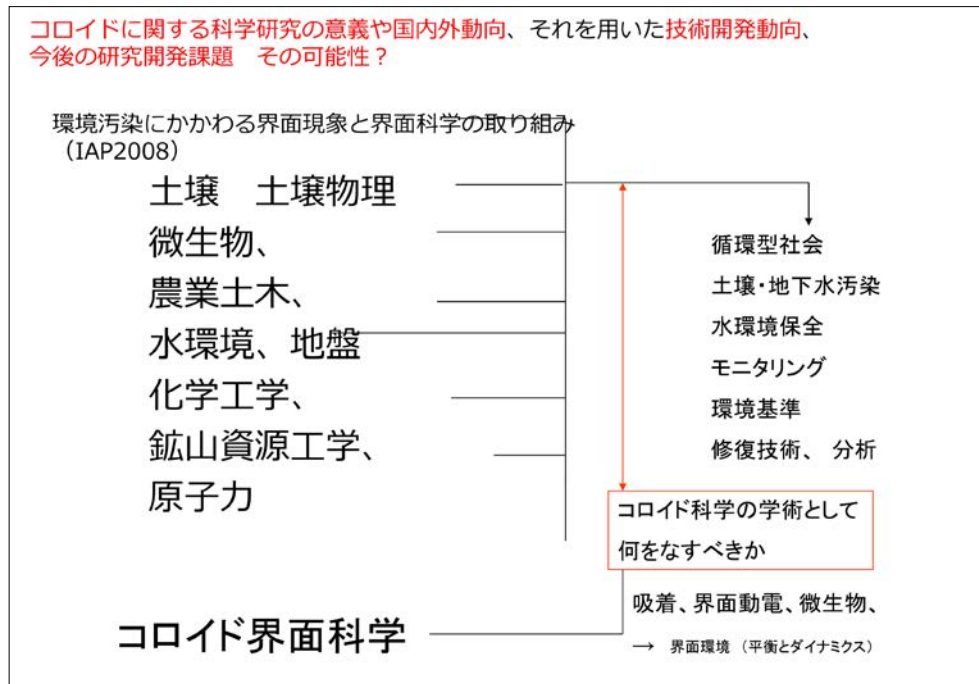


図 4-2-6 Interfaces Against Pollution 2008

今後の課題としては、ナノテク・材料の可能性という観点からは、制御した流動系で凝集体そのものの生成メカニズムをきちんと調べるのが重要な研究対象になる。この部分は未だ分かっていないことがある。また水利用の持続性にフォーカスすると凝集剤の探索（天然有機化合物や粘土、その複合体）など色々研究テーマがあると思われる。

技術開発との関係では膜分離の前処理としての凝集や分離膜の洗浄、砂ろ過の前段階における凝集体の制御でまだ活躍する余地がある（図 4-2-7）。流動現象は層流ではかなり解析されてきているが乱流中の挙動解明は未だ課題である。凝集が乱流によって変わる、あるいは乱流が凝集によって引き起こされるなどの問題がある。界面動電現象としては制御された流れ場における高精度な凝集体の形成過程の制御及びフロックの物性評価、環境にやさしい凝集剤の探索などが考えられる。

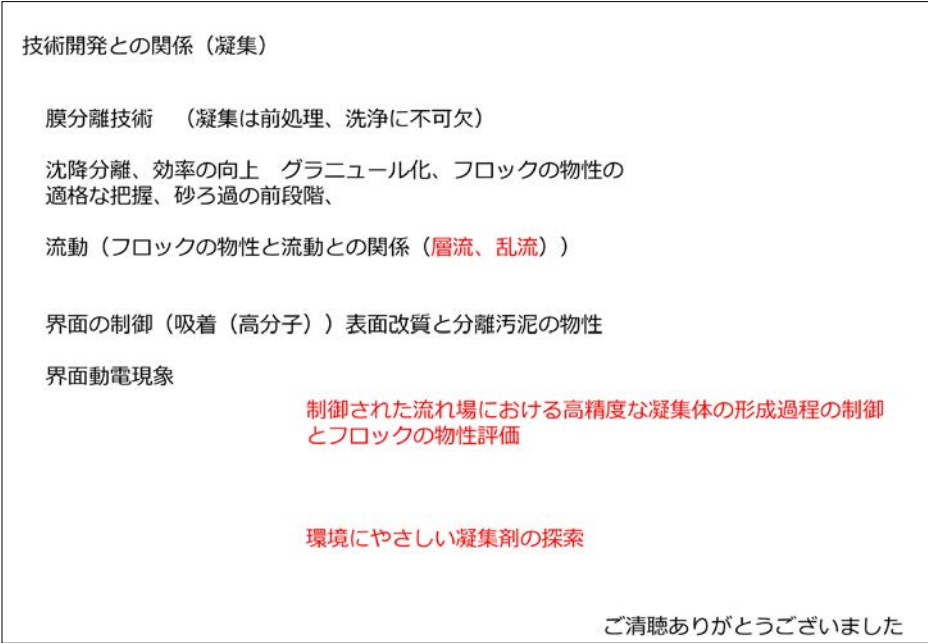


図 4-2-7
 技術開発との関係

4.3 純粋科学研究としてのPFAS問題とその解決方法 — PFAS対策技術コンソーシアムからの提言

山下信義（産業技術総合研究所）

非公開のため掲載省略

参考：PFAS 対策技術コンソーシアム（2021 年 6 月設立）

<https://unit.aist.go.jp/mcml/rg-org/pfasconsortium.html>（2024 年 5 月 9 日アクセス）

4.4 革新的な超高純度リチウム直接回収技術の社会実装

星野毅（量子科学技術研究開発機構）

私の所属する量子科学技術研究開発機構（QST）では、核融合炉の研究開発を行っている。開発中の核融合炉は燃料としてトリチウム（三重水素）を必要とするが、この元素は自然界にほとんど存在しないため、これを人工的に作り出す必要がある。リチウムに中性子を照射して起こる核反応で、トリチウムが生成することが知られているため、核融合炉に必用なりチウムを海外から安定調達し、最終的にはほぼ無尽蔵のリチウムが含まれる海水からリチウム回収を行うことで、エネルギー資源を国内で確保することは核融合炉開発の大きなミッションの1つになっている。

しかしながら、核融合炉が実際に稼働する時期を考慮すると、発電実証炉（原型炉）の建設判断が2035年のため、2040年代半ばぐらいにならないと、積極的にトリチウムが必要にはならない。一方で、ここ最近のEVの需要の急拡大に伴い、リチウム資源の価格が乱高下しており、リチウムイオン電池（LIB）のための資源の安定調達が求められている。そこで、われわれの持っている新たな超高純度リチウム回収技術であるイオン伝導体リチウム分離法（LiSMIC）がLIB向けに貢献できるのであれば、LiSMICを早期社会実装し、核融合技術を社会還元することが重要と考え、2023年7月にQST認定ベンチャーとして、LiSTie株式会社を設立した。リチウムは主にチリ、アルゼンチン等の南米の塩湖や、オーストラリアの鉱石から生産されているが、最終的には海水から回収することで、日本国内で未来永劫の核融合エネルギー源を得ることが目標である。

基本的なLiSMICの装置構成を、図4-4-1に示す。リチウムイオン伝導体をセラミックス膜として成型したものを使用した、世界的にも新たなリチウム分離技術である。通常、膜を用いた分離技術においては有機系のフィルター膜が使われるのが主流であるが、99.5%以上といった高純度なりチウムが求められる核融合やリチウムイオン電池用途については、従来の「リチウムの選択性のある」有機系フィルターでは、どうしても他の元素が膜を透過してしまい、回収液のリチウム純度が下がってしまうという点が問題となる。その解決策として、セラミックス製の板をリチウム分離膜として使用することに着目した。

本セラミックスは、基本的には茶碗と同様に水は通さないが、リチウムイオン伝導性を付与するために、結晶構造中にリチウムがいて安定な位置に空孔を作り、ビリヤードの玉突き状態のように、原液から膜表面に入ったリチウムが、膜中のリチウムを押し出す形で移動し、膜の回収液面のリチウムが押し出される仕組みである。理論上はリチウム以外の元素は透過しないため、超高純度リチウムがワンパスで入手できることがLiSMICの大きな特徴である。装置構成は非常に簡単で、厚みが0.5ミリ程度のセラミックス膜を2つの電極で挟み、パッキン材で原液と回収液を混ざらないようにしたうえで、電極間に電圧をかける。この電圧がリチウム移動のドライビングフォースになり、リチウムイオンを原液から回収液へ移動させることができる。

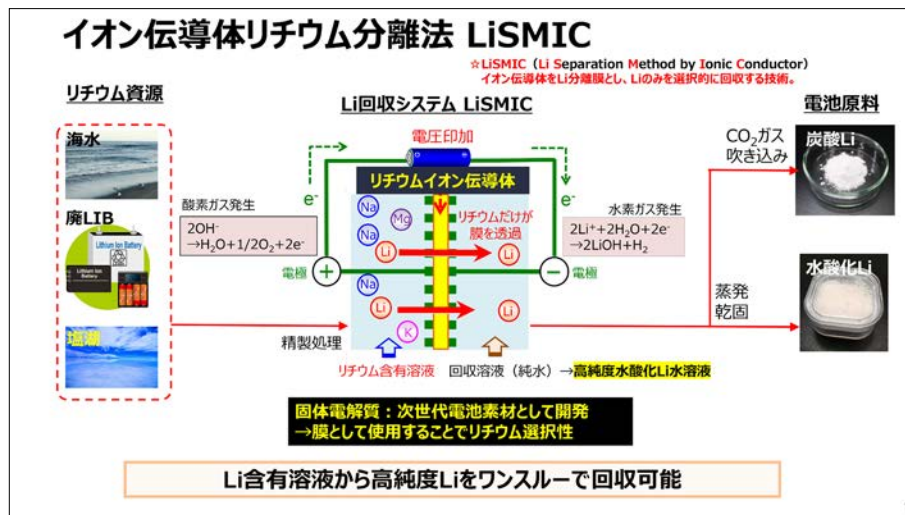


図 4-4-1 イオン伝導体を用いたリチウムの分離方法 LiSMIC
 (Li Separation Method by Ionic Conductor)

QSTでは社会実装としてこの技術を海水以外の幅広い場面で応用したいと考えているが、現状ではまだ海水からの回収は難しい。それは、リチウムの回収速度が原液中のリチウム濃度に依存するため、LiSMICによるリチウム回収コストが成立するためには、一定のリチウム濃度が求められる。そこで、現時点でLiSMICが適用可能な日本国内のリチウム源の1つとして、LIBのリサイクルに適用する研究開発を行っている。現行のLIBのリサイクルにおいては、コスト面からリチウムの回収は行われておらず、ニッケルやコバルトといったレアメタルのリサイクルだけが行われている。

LIBリサイクルは、最初にLIBを焙焼させることから始まる。LIBは燃えやすく、焙焼後にはブラックパウダーと呼ばれる黒い灰のようなものが残るが、現行では、それを酸などに溶かして、コバルトやニッケルなどの有価金属を溶媒抽出法にて回収している。近年、ヨーロッパではバッテリー規則が制定され、新しいEV用LIBを製造する際は、リサイクルで得られたリチウムを一定の割合で使用することが義務付けられる。そこで、使用済LIBからのリチウム回収が今後必須となることから、新たなリチウム回収法として、ブラックパウダーを水に浸して、水に溶けやすいリチウムを水側に溶解したものをLiSMICの原液とする方法を検討した。コバルトやニッケルは水に溶けないため、リチウムを水浸出した後にろ過して、残った黒い粉末は既存のコバルト、ニッケル抽出プロセスに回す。われわれはリチウムの水浸出溶液の方を利用して、LiSMICで高純度リチウムを回収する。現在、図 4-4-2 のように量産に向けた検討を行っている。

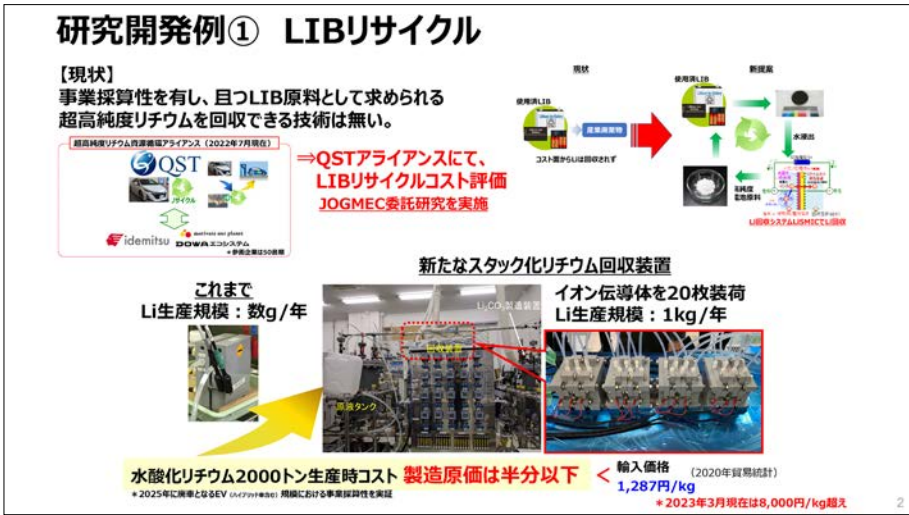


図 4-4-2 LIB リサイクルの例

別の適用例としては、海外からの輸入に頼っている塩湖かん水からの回収プロセスについても研究開発を行っている（図 4-4-3）。南米の塩湖の場合、砂漠地帯のため地上には湖はないが、乾いた食塩層の地下にかん水というリチウムを含む地下水が存在しているため、その地下水をポンプでくみ上げて、人工的に湖を造る。その水を蒸発させると徐々に、ナトリウム、カリウム、マグネシウムなどの結晶が析出するが、リチウムは水に溶けやすいため、蒸発を続けてもリチウムが析出することではなく、濃縮したリチウム水のようなものができる。最後に、微量に共存するマグネシウムを、ケミカルプロセスで取り除いてから、リチウムを抽出するという方法を取っている。今南米で問題となっているのは、蒸発法であるという点で、特にチリでは、地下水を蒸発で失うことで砂漠地帯の数少ないオアシスの水が地下に流れ込み、更に砂漠化が進むことによる生態系への影響（フラミンゴ等の動植物の生活への影響）が大問題になっている。

そこで、水を蒸発させないでリチウム回収する方法（ダイレクトリチウム回収法：DLE）が求められている。チリの政府方針でも、2030 年以降は DLE に切り替える方針を示しており、水を蒸発させることが一切ない LiSMIC はこの点でも社会問題に貢献できると考えている。

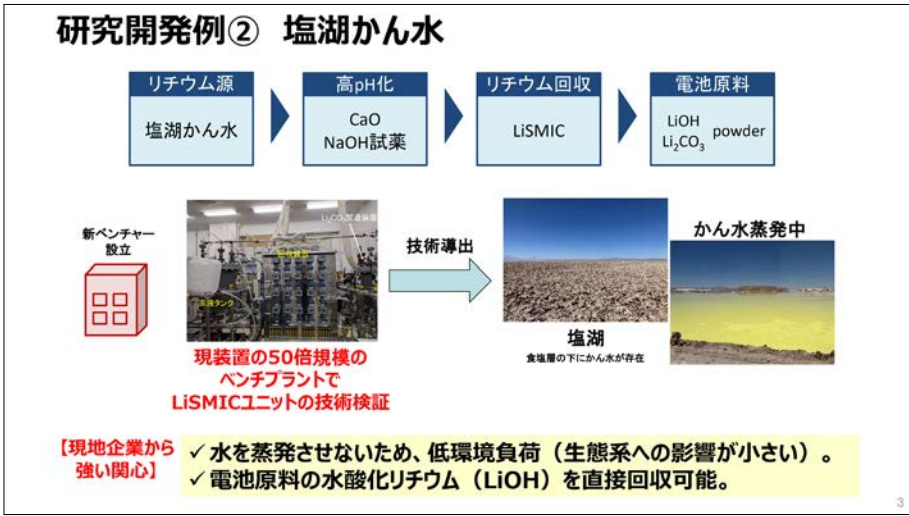


図 4-4-3 塩湖かん水からのリチウム回収の例

先ほどのかん水の課題と同様、鉱石からのリチウム生産にも、環境負荷の問題が存在している。現在は、リチウムを原料鉱石の採れるオーストラリアで生産しているわけではなく、リチウム含有率が低い鉱石を中国に輸送して、中国で溶かして抽出するというを行っている。リチウムを溶かすためには、石炭などの化石燃料を使って鉱石を1,000℃ぐらいに加熱することで、鉱石中にあるリチウムの結晶相を、強酸に溶けやすいような結晶相に変え、その後、硫酸などを使って強制的に溶出させるといった方法を取っている。この方法は、薬剤を多く使うため環境への影響も大きく、また、加熱のための化石燃料使用の点で、CO₂排出問題にも関係してくるため、そうした点でもLiSMICへの置き換えで課題が解決できると考えている。

我々のもう一つの技術的な優位性として最も重要な点は、一度膜を通せば、99.5%以上のリチウム純度が確保できるという点がある（図4-4-4）。従来技術による製造コストが炭酸リチウムを1キログラム作るのに4ドルぐらいであったのに対し、我々のLiSMICを使えば塩湖の場合はCAPEX及びOPEXで3ドル程度に低コスト化できるうえ、できたものの純度が高いというメリットもあることから、技術的競争力は高いと考えている。

LiSMIC基本技術の知財権は、QSTが保有している。LiSTie株式会社はQSTの認定ベンチャーという形でスタートしたため、QSTの特許群を独占的に利用するような形で会社運営もできる形になっている。

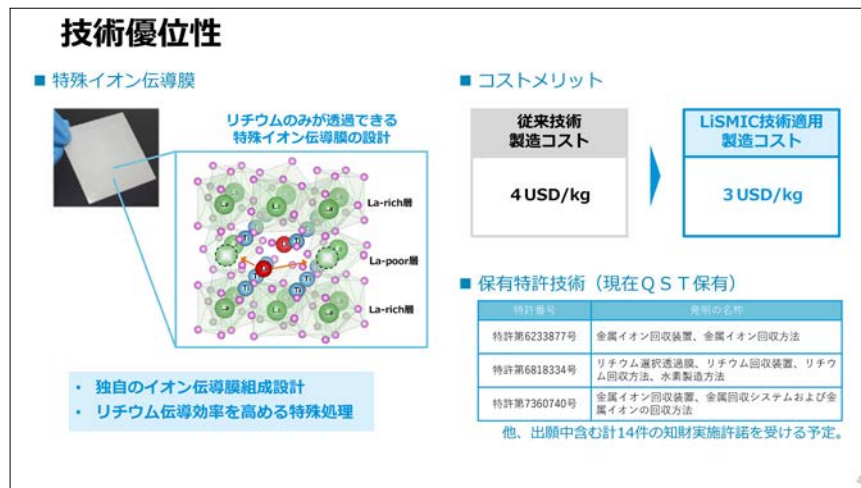


図4-4-4 QST保有技術の優位性

また、LiSTie株式会社はQSTとのコンソーシアムを形成し、2023年10月に、SBIR（Small Business Innovation Research）大規模技術実証（フェーズ3）核融合分野に、採択された（開発期間：2023年～2027年、開発費：約15億円）。図4-4-5のように膜を並べた装置（図中ユニット）の技術を今年度含めて5年以内に確立し、色々な社会課題がある市場でLiSTie株式会社の技術を導出していきたいと考えている。

最終的には核融合へ技術適用を考えなければならないので、2040年頃には海水からのリチウム回収の基礎技術を固めることを目指す。現状のLiSMICでは、一定以上のリチウム濃度が必要なため、使用済みLIBや塩湖かん水を対象としているが、膜の開発・改良を行っていくことで、速度向上が見込めると考えている。

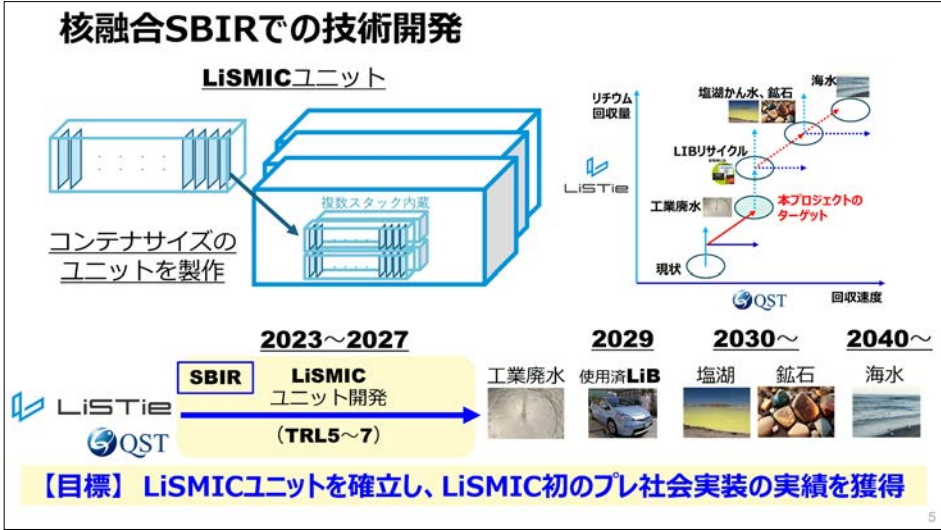


図 4-4-5 SBIR（Small Business Innovation Research）大規模実証での技術開発内容

核融合は非常に先の長い研究開発分野であるが、その開発で得られた技術は遠い先にならないと使えないわけではなく、本日の講演で示した技術のように、国内・海外の様々な場所や用途に展開していくことが可能であることを、LiSTie 株式会社で示したい。

4.5 セッション討議

Q：質問、A：回答、C：関連意見・コメント等

【アフリカで実証試験中の結晶材料について】

※本件のみ発表直後に質疑応答を実施。

Q：現場の水処理ではコストも重要だが維持管理の観点から結晶材料の再利用や再生処理などの可能性はどうか。

A：無機材料なのでリサイクルは可能と考えている。重金属を除去する結晶材料NTOに関しては、現地の重金属濃度は基準値よりも少し高い程度であるので、われわれの結晶材料を今回は100キログラム使用しているが10年から20年は交換無しで使えると見積もっている。一方フッ素に関しては汚染濃度が高いため、LDHは1カ月に1回交換しなければならない。ご指摘の通りリサイクルできる材料であるかは大きなポイントである。リサイクルも含めて現地での実証に耐えうるかを考えて進めている。なおタンザニアでは2023年11月にハリケーンのようなものが来て設備の一部が壊れてしまい、今回の訪問で装置が停止していることを確認した（2024年3月）。幸い水源は生き残っていたが、われわれが設置したのは非常に簡便な緩速ろ過型の装置だったのである程度の不測の事態には耐え得ると思っていたが、現地の状況に鑑みて改良しなければいけないことが見えてきた。村人の行動を理解して、また村人に理解してもらうところから始めて、きちんとした教育が必要であること、すなわちキャパシティデベロップメントの取り組みがたとえ簡便な装置であっても重要なことも現状の課題として分かってきた。

【イオン伝導体リチウム分離法 LiSMICについて】

Q：リチウム回収の実験はどの程度のリチウムイオン濃度で実施しているのか。海水からのリチウム回収は可能か。

A：実験ではリチウム濃度1,000ppmを基準としている。海水中では圧倒的にナトリウムイオンが多く1万ppmであり、対してリチウムイオンは0.17ppm程度しかない。海水からのリチウム回収も可能ではあるが、濃度が高いほどリチウム回収速度は早くなることから、海水の場合は高コストになってしまう。

Q：原液中のナトリウムイオンなどの影響はどうか。

A：原液中にナトリウムやマグネシウムのイオンが共存しても悪影響はない。ナトリウムイオンを約1万ppm入れた試験でも、リチウム回収速度はほぼ変わらなかった。

C：伝導度を上げるためには、薄膜化が有効だろう。装置として求められる強度を持たせるために支持体による補強が有効かもしれない。

Q：海水を対象とした場合、コスト競争力を持たせるためには、イオン伝導度の向上以外に考慮すべき点はあるか。

A：水中にプロトンがあると、現状のイオン伝導体では膜表面にプロトンが入り込み、イオン伝導を阻害している可能性がある。リチウムイオンよりプロトンの移動が圧倒的に遅いので結果としてプロトンが入るとリチウムの伝導パスとなる空孔が詰まり、リチウムの流れが遅くなるということが起こっている。その改善が必要と考えている。

C：イオン交換膜を用いた電解透析の際も、膜界面での分極が問題になる。また、カルシウム塩などが表面に析出するなど大きな問題が出てくることがある。

A：ベンチャーを立ち上げたものの、基本的なメカニズムが分かっていない点が残っており、社会実装への事業はLiSTie株式会社が先行、メカニズムはQSTとして研究していきたいと考えている。

【環境中のコロイドの理解・分離技術開発について】

- Q：粒子自身が持つゼータ電位によって凝集形態が変わる。表面の凹凸など形状によって電位が変わり、物理現象も変化するのではないかな。基本的な系の理解はできても、一般化するのは難しいのではないかな。
- A：ゼータ電位は、最近ではメーカーからきちんとした装置が販売されており、測定は以前ほど難しくなくなっている。ただし、きれいな形状の物質に限られており、表面に凹凸があったり突起が生えたりすると測定が難しい。ゼータ電位も精緻にみると界面構造など物理現象にまで立ち返ることになるが、平均場で捉えるゼータ電位を指標にして理解しようとする研究も有効だと考えている。
- DLVO 理論（液体中の表面間力および粒子分散系の安定性に関する理論）は平均場で考えるものだが、いろいろと応用できることが分かってきている。
- C：凝集後の形態の検討はあまり進んでいなかった。実際の系は乱流だが、乱流では実際に何が起きているか捉えることが難しい。最近、横置き型の層流の流動相で検討すると、凝集体が丸くなっていく現象が捉えられている。このような課題がまだ多くある。単純系でも分かっていないので複雑にすると何も分からなくなる可能性はあるが、そこを突き詰めることは重要である。一回できた凝集体が壊れて、再配列して丸くなっていくプロセスは検討する必要がある。沈降速度やレオロジー特性が経時的に変わってくる。流体力学が関わってくるサイズであり面白い現象が出てきた。
- C：気体と液体との違いはあるかもしれないが、エンジンのターボチャージャーから出てきた煤の粒子が丸くなるのも今の話に通ずるところがある。

5 | セッション3：つかう

5.1 水電解装置と欧州プロジェクトのご紹介

花木保成（株式会社堀場製作所）

本日は水電解装置の話と欧州プロジェクトH2Gigaの紹介をしたい。弊社は学生ベンチャーの先駆けとっていただいているが、1950年の国内初のガラス電極のpH計からスタートしている。現在は水質の管理、地球環境保全、自動車製造プロセス、健康・安全、ITインフラ、新素材の分析、農業、ごく最近では宇宙開発など様々な分野を対象としている（図5-1-1）。



図 5-1-1 事業領域

液体計測、ガス流量制御、赤外線計測、粒子計測、分光分析をコア技術に、エネルギー・環境、バイオ・ヘルスケア、材料・半導体を三本柱と位置づけて取り組んでいる（図5-1-2）。

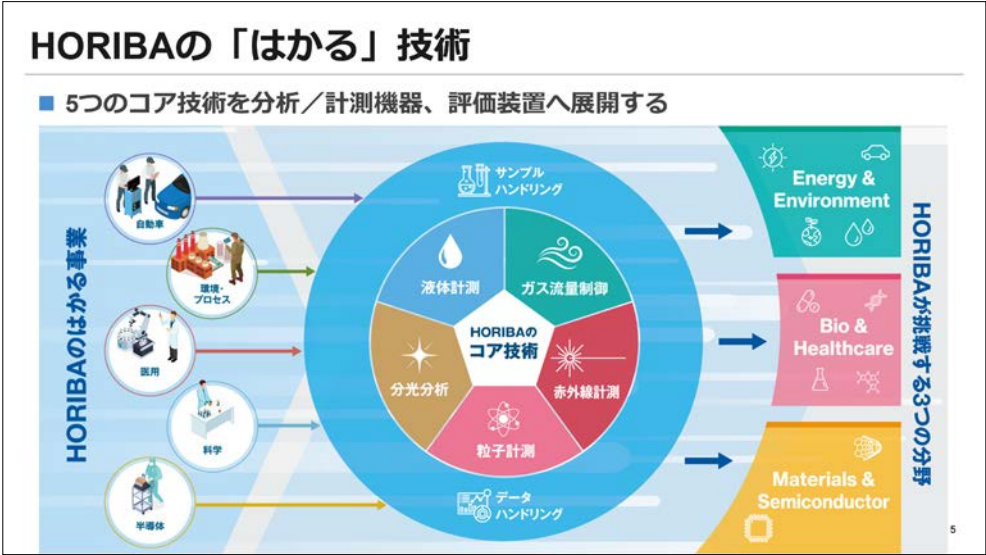


図 5-1-2
 HORIBAの「はかる」技術

水電解の概要について説明する。代表的なタイプとしては図5-1-3の4種類が挙げられる。今、社会実装に向けて大きく動いているのはアルカリ形とPEM（Proton Exchange Membrane）形であるが、固体酸化物形のSOEC（Solid Oxide Electrolysis Cell）も注目を浴びてきている。さらにアニオン形のAEM（Anion Exchange Membrane）の検討も増えつつある。IEAの予測では、主力はアルカリ形で、それに追隨してPEM形、次いでSOEC形、2030年くらいからAEM形が出てくるとなっている（図5-1-4）。ファンドの状況を見ていくと、海外ではかなりSOECに対して投資が入っており、当社への依頼もSOECの案件が増えてきている。2030年、2040年といった先を見据えての研究開発や量産トライアルの動きがすでに始まっていると思われる。

水電解の種類				
	アルカリ形	PEM形 (プロトン交換膜)	SOEC (高温水蒸気)	AEM形 (アニオン交換膜)
Stage	実用レベル	実用レベル	開発フェーズ→実用化	開発フェーズ
+	-技術の成熟度 -比較的安価	-応答性が早いので再エネとの親和性が高い -サイズが小さい -高純度の水素製造	-変換効率が高い -他の化学プロセスとの組み合わせに最適	-応答性が早い -触媒に貴金属を使わず 素材費用削減
-	-サイズが大きい -KOHの管理	-比較的高価 -原材料供給量 (Ir)	-未だパワーサイズが小さい	-材料設計（アニオン膜） -pH, 伝導率管理
弊社製品 強み・特徴	-濃度/バランスコントロール (KOH, H2O) -高圧対応 (50bar)	-高圧対応 (100bar)	-安定した水蒸気供給 -マルチスタック対応→量産装置	-開発フェーズ

図 5-1-3
 水電解の種類

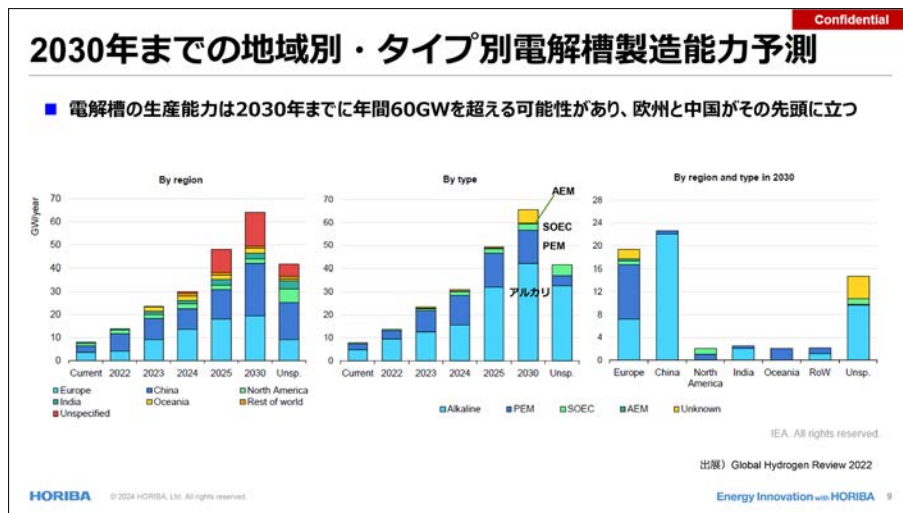


図 5-1-4 2030年までの地域別・タイプ別電解槽製造能力予測

このように水電解が増えていった時に、水素量の目標値から考えて水がどれほど必要になるかを見積もったのが図5-1-5である。IRENAの1.5度達成パスシナリオでは、2050年の水素供給量5.23億トン、電解槽能力5,722GWが予測されている。他の予測をみても若干設備能力に振れ幅はあるが、水素量としてはこれに近い値となっている。この水素量をもとに単純に理論計算すると水は少なくとも50億トンが必要となり、効率を考えるとこの倍近くの水が必要になると考えられる。

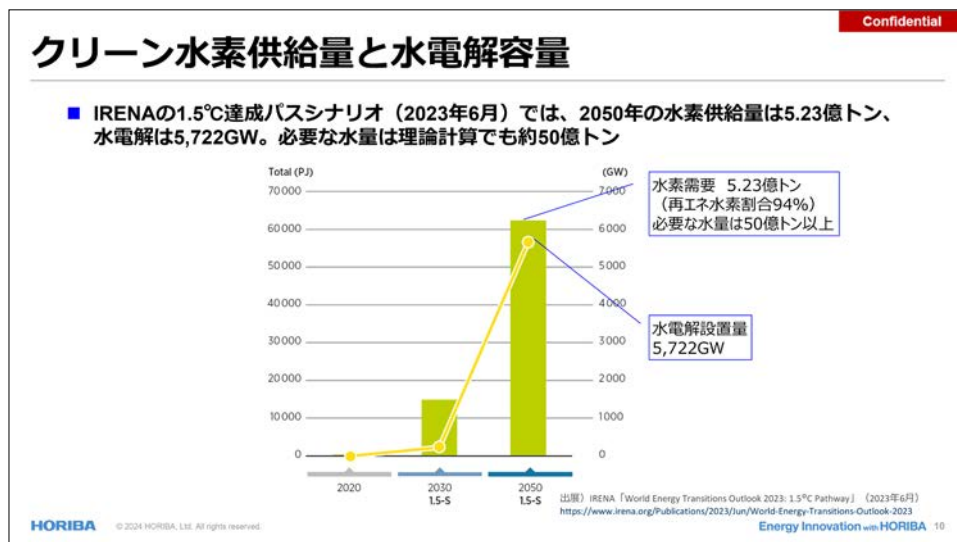


図 5-1-5 クリーン水素供給量と水電解容量

水電解の種類と、求められる水の電気伝導度の関係を整理したのが図5-1-6である。左側に低い電気伝導率が求められるPEM形が位置し、SOEC形が純水レベル、右の電気伝導率が高い領域に海水（参考）、AEM形、アルカリ形が位置する。PEM形に求められる水の質については、 $10 \mu S/cm$ でよいということもあれば厳密に $0.1 \mu S/cm$ が必要だということもある。値に幅はあるものの、純度の高い水が必要とされるところで検討されている。

今後の動きについてコメントすると、PEM形については装置が高価であることが課題となっている。特に電解槽では貴金属を多量に使用した高価な電極触媒が用いられている。原材料にIrを使用していることが大きい。Irは供給面でも課題がある。そのため代替材料の研究が盛んに行われている。また純度の高い水を必要とするので、水を純水化するシステムも必要となる。一方、伝導率が高い水を使用するアルカリ水電解では、アルカリ水をどう制御、管理していくか、アルカリによる設備・装置の腐食の課題が挙げられる。既に研究は始められているが、将来的には使いやすい電極材料や、電解液のpHの観点ではもう少し中性に寄った水電解になっていくのではないかと考えられている。

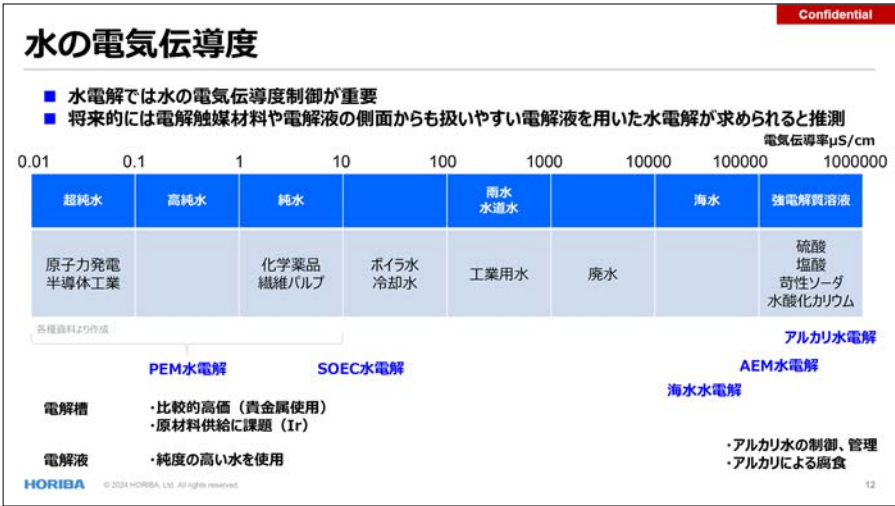


図 5-1-6 水の電気伝導度

続いて当社が参画しているドイツのH2Gigaプロジェクトについて紹介する。ドイツの連邦教育・研究省も水素の製造や輸送に関するプロジェクトを推進し、利活用に向けたインフラ整備を進めている。同省は2021年1月にグリーン水素経済を発展させるための主要プロジェクトとして、3つのプロジェクト「H2Giga」「H2Mare」「TransHyDE」を発表した。2025年までに総額7億4,000万ユーロを助成する。資金提供機関はBMBF（連邦教育・研究省）である。

H2Gigaでは、電解槽の量産化を目指す。既に市場投入されている電解槽は多くが個別生産で費用がかさむ。同プロジェクトでは、電解槽の量産化を実現することで価格を下げ、その結果、製造した水素の価格も下げることを目指す。H2Gigaは、4つのプラットフォームでできている（図5-1-7）。「イノベーションプール」に材料研究をはじめ14件のテーマが流れており、「スケールアッププロジェクト」で10件、「次世代のスケールアップ・プロジェクト」で5件のテーマが流れている。水電解の方式としてはアルカリ電解形（図ではAEL）、PEM形、SOEC形（図ではHTEL）、AEM形と全方位に進められている。128の企業・研究機関が参画、日系企業関連では当社の子会社のHORIBA FuelConが参加し、水電解装置評価技術を提供している。同社は具体的には、H2Gigaの一環として行われるプロジェクト「HTEL-Stacks」で、電解槽メーカーのSunfireやフラウンホーファー研究機構セラミック技術・システム研究所（IKTS）、バイロイト大学などとともに、高温水蒸気電解をベースとする電解槽の量産化の研究開発に関与している（図5-1-8）。

プロジェクトを通して感じることは、SOEC形はこれからの技術であるが、欧州は欧州委員会中心に2010年ごろから幾つかのプロジェクトをスタートさせており、並行して標準化に向けた取り組みを行っていることである。そこに参画しているのは、TOPSOE、CEA、Sunfire、DTUなど高い技術力を持った企業である。当社もこれらの会社と交流を持ちながら取り組んでいる状況である。

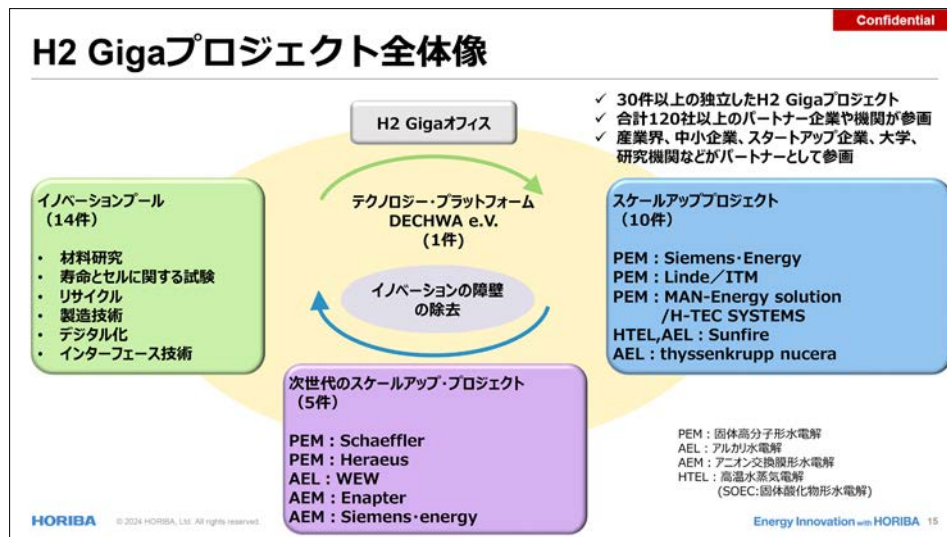


図 5-1-7 H2Giga プロジェクト全体像



図 5-1-8 H2Giga HTEL

5.2 水中からのウルトラファインバブル生成と ウルトラファインバブル水の凍結

寺坂宏一（慶應義塾大学）

私の専門は化学工学で、30年以上「泡」を研究している。2001年以降マイクロバブル、2013年以降はファインバブル、最近はウルトラファインバブルという専門用語でよばれる、おおむね100ナノメートルぐらいの非常に小さい泡の研究に注力している。今回のワークショップは「水」がテーマであるが、私の話題提供は「水」よりも水中の空気粒子である。

「ウルトラファインバブル」という用語はISO（国際標準機構）で世界の合意によって定義されている（図5-2-1）。巷には「ナノバブル」という似た言葉も耳にするが、「ナノバブル」は共通定義がなく、「あなたのナノバブル」と「彼のナノバブル」は同姓同名の別物である。このような不適切で不便な状況を解決するために、ISOで国際標準規格「ウルトラファインバブル」が成立した。とくに産業界の方は仕様、国際取引、保証などでのトラブルが減るように、国際標準規格に沿った用語を使うということが、健全な産業発展のために大変重要である。

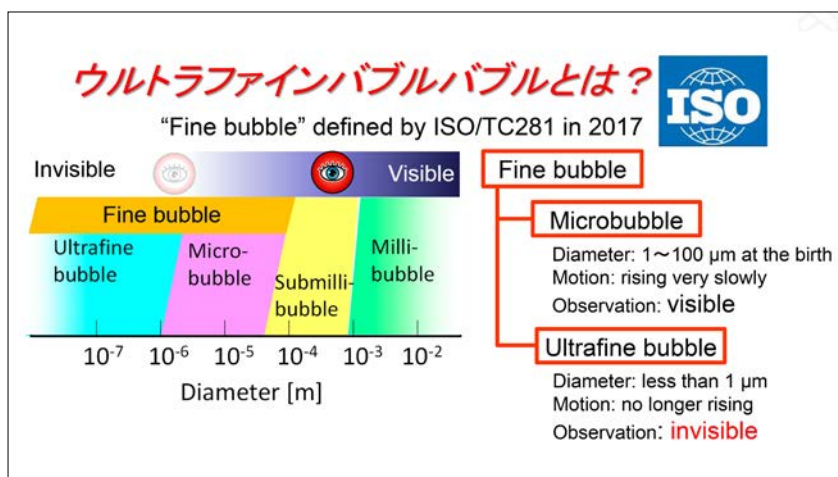


図5-2-1 ISOによるウルトラファインバブルの定義

ISOで定義された「ファインバブル」は直径1～100ミクロンの「マイクロバブル」と、直径1ミクロン未満の「ウルトラファインバブル」の二つからなる。本ワークショップにはナノテクに関心をもつ方が多く参加しているので、「ウルトラファインバブル」について紹介する。

ウルトラファインバブルの重要な特徴としては、泡が肉眼や光学顕微鏡では見えない。次に浮力がほぼ無視できるためもはや浮上せず、水中に数カ月以上長く留まる。これらの特徴は、食塩水や牛乳のように水中にとけた溶質やコロイドに似た性質で、従来の炭酸飲料や曝気槽とは全く異なる。

図5-2-2に、ウルトラファインバブルが持つ代表的な作用を紹介する。水中のウルトラファインバブルは表面にゼータ電位を有する。先の環境中のコロイドに関する講演でも、吸着やゼータ電位の話題があったが泡の分野でも非常に重要な物性である。ウルトラファインバブルは「水中に留まり続ける泡」なので一種のコロイドと見做せる。そのため表面電位はとても重要で、ウルトラファインバブルへの吸着に応用できる。

ウルトラファインバブルは内部に気体を貯蔵できる。刺激を与え泡を破壊すれば内包ガスを放出できる。内包ガスとして反応性や殺菌性の高いオゾンなども選択できる。

ウルトラファインバブルを適切な条件下で破壊すると衝撃波を発する。泡の極近傍にいる異物の除去に使用すれば洗浄などに応用できる。

ウルトラファインバブルの生理活性も知られており、例えば植物へ酸素供給や液肥の供給などの農業応用にも大変有用で、既に活用が始まっている。

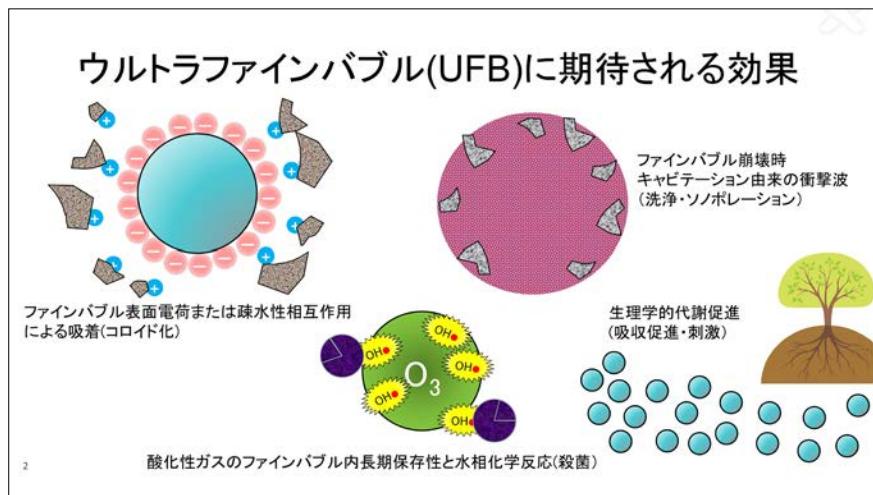


図5-2-2 ウルトラファインバブルの効果・用途

水中でウルトラファインバブルはどのようにして誕生するのかはこれまでに数々の仮説が提案されていたが、観察できる現象を説明できる理論がなかった。これではウルトラファインバブルの未知の応用を考えるとに不都合で、試しにやってみる、以外に手段がないことになる。しかしながらようやくウルトラファインバブルが水中からどのように生成するのかを説明し得る仮説の提出と、その実験的検証に成功したので紹介する。図5-2-3に水中での通常気泡誕生とウルトラファインバブル誕生とを対比させたイメージ図を示す。

水は気体の溶解度をもつ。水の溶解度を超えて溶存した気体のみが泡になりえるのでガス過飽和度が泡の生成には最重要である。水中に過飽和で気体が溶けている状態とは、ガス分子が水分子群中に空間均一に分布していると想像してしまう。しかしガス過飽和水を調製時の都合で、現実には大きな偏りができる(図5-2-3(A))。極端な例として1点のみの溶存ガスの偏りがあると、そこで大きな泡が1個発生し、浮力を持ち、浮上離脱して泡が無い水が残る。

一方、図5-2-3(B)のように水中に空間均一なガス分子分布を実現すると、気泡誕生のきっかけとなる核発生が空間的に同時多発する。核1個あたりに気泡化するためのガス物質量は核個数で按分されるので、1個の気泡は極小のウルトラファインバブルとなる。ウルトラファインバブルの浮力は極めて小さいので浮上せず水中に留まる。

図5-2-3の(A)と(B)のイメージ図では赤いガス分子個数と青い水の分子個数は同数だが、初期条件の違いで結果が異なることを表している。この気泡核誕生前の状態を私は「発泡準備水」と呼んでいる。

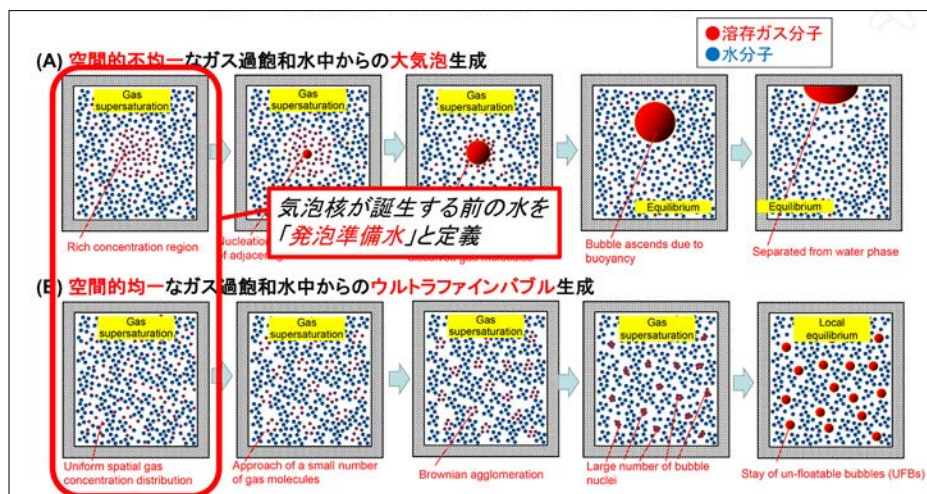


図 5-2-3 溶存ガスの空間濃度分布の相違と気泡核発生・気泡成長との関係

水中にガスをバブリングして、空間均一に溶解した水を作ることは困難である。しかし、ガス中にガスを均一に混合することは拡散係数が大きいので容易である。そこでまずスチーム（気体の水）とガスとの空間均一混合物を作成した（図 5-2-4 の左図）。この混合ガスをゆっくり冷やすと、スチームは凝縮しつつガス分子を分離しながら水になる（図 5-2-4 の中央図）。ところが、急速にスチームを凝縮させると近隣のガス分子も同伴して液化する（図 5-2-4 の右図）。液化前に空間均一分布が達成されていれば、急速凝縮後も均一性を保ちつつ発泡準備水ができると予想できる。

私の仮説に基づいて以上の現象が起こるか否かを実験により検証した。急速凝縮水中には多数のウルトラファインバブルが生成されていることが、ウルトラファインバブル計測器によって確認できたので、仮説は実験的に裏付けられた。この技術は新しいウルトラファインバブル製造法としての新規性もあり特許公開されている。

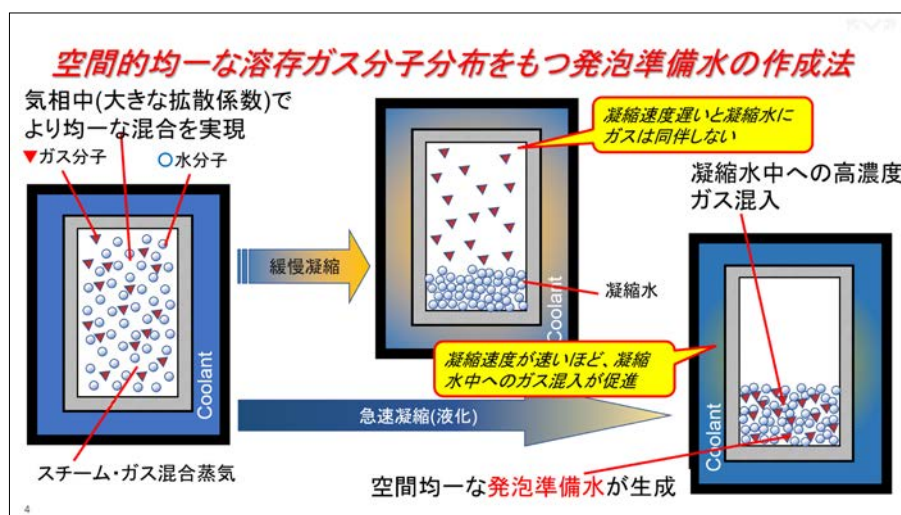


図 5-2-4 気相からの急速凝縮を利用した空間的に均一な発泡準備水生成方法

以上では、スチーム（気体の水）が相変化によって液化する際に生じるウルトラファインバブル生成現象を紹介したが、つぎにウルトラファインバブルを大量に含む水を冷却し凍らせる際のウルトラファインバブルの挙動について行った研究を紹介する。

ウльтраファインバブルを含む水（液体）を高速に凍らせると、成長してくる氷層の中にウльтраファインバブルは取り込まれる（図5-2-5の急速界面前進部分凍結）。氷が凍結する時には、樹氷状のデンドライト構造が成長し、ウльтраファインバブルは簡単に氷層の中に取り込まれる。一方、極ゆっくりと凍らせた場合には、ウльтраファインバブルは氷界面の成長速度よりも早く未凍結水中に拡散できるので氷層中に取り込まれない（図5-2-5の緩慢界面前進部分凍結）。その結果まだ凍っていない水は初期状態よりも泡の数密度の高い水となると考えた仮説を提案した。すなわちこの技術を使うと水中でウльтраファインバブルの濃縮ができる。またウльтраファインバブルを含まない氷の生成も同時にできる。この手法は低温でのウльтраファインバブルの濃縮技術として特許出願されている。

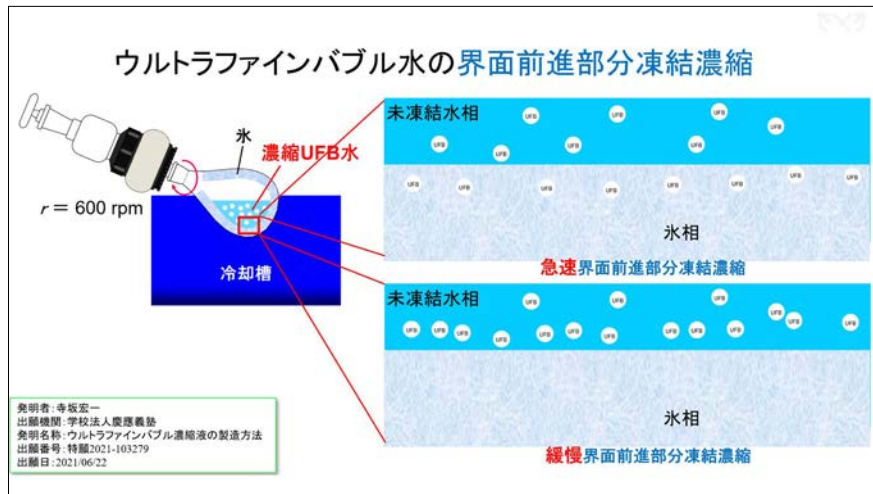


図5-2-5 ウльтраファインバブルの凍結濃縮

図5-2-6にウльтраファインバブルが入った水を画面左から右へ、緩慢前進凍結あるいは急速前進凍結させた後の氷相内の顕微鏡写真の比較を示した。緩慢に凍結させると氷相には泡は取り込まれないが、急速に凍結させると、氷相中に多数の泡（マイクロバブル）が観察された。ウльтраファインバブルが入った水では、水が凍結していく過程でウльтраファインバブルが合体し目に見えるサイズのマイクロバブルになった。明らかに、ウльтраファインバブルがあるか否か、緩慢に凍結させるか急速に凍結させるか、で異なる結果が出たことになる。

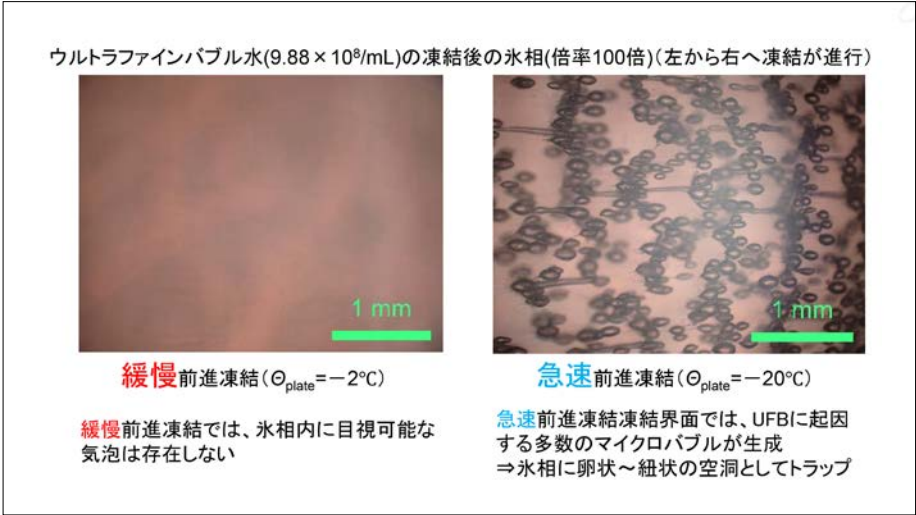


図 5-2-6 ウルトラファインバブルを含む水を異なる凍結速度で凍らせたときの比較

ウルトラファインバブルの入っている水と入っていない水が、それぞれ氷結する過程での熱量変化をDSC (Differential Scanning Calorimetry、示差走査熱量計) 測定を行うと、その結果に顕著な違いが見られた。ウルトラファインバブルが入っていない超純水では、核発生が起こりにくくなかなか凍り始めないため、10回の計測で凍結凝固温度が10回ともバラバラになる結果となった。これは水が凍り始める温度は常にランダムになるという常識的な現象である。ところがウルトラファインバブルを入れた水を凍らせていくと、10回中7回が、ほぼ同じ凝固温度を示した。この結果はウルトラファインバブルによって水の凝固点を制御できる可能性があることである。分離が容易で液体や固体を汚さない気体で水の氷結挙動を制御できると、凍結に関わるエネルギーコントロールが簡単化できる。

最後に図 5-2-7 に本日の講演内容をまとめた。

まとめ

ウルトラファインバブルの応用

水で隔離されたガスを内包する粒子で、浮上も溶解もせず、長期間水中に滞在
界面吸着、ガス貯蔵、ガス放出・・・、多くの利用できる性質をもつ

1. 水中でのウルトラファインバブルの生成

ウルトラファインバブルの生成には、下記の2条件が必要

- (1) 水中でのガス過飽和
- (2) 水中で溶存ガス分子の空間均一分布

2. 界面緩慢前進部分凍結による水中でのウルトラファインバブル濃縮

ウルトラファインバブルは水凍結凝固開始のトリガーとなる
水の凍結、氷の品質の制御の可能性をもつ

図 5-2-7 まとめ

5.3 沸騰冷却技術の最新動向と未来展望

森昌司（九州大学）

沸騰技術は特に水だけを対象とするわけではないが、水は蒸発潜熱が非常に大きいので、冷却性能を高く保つためには非常に熱伝導が悪い冷媒であるということが最近分かってきている。

沸騰・蒸発を用いるアプリケーションとしては、ヒートパイプ、パワーデバイスの冷却、データセンター、エアコン、火力発電などの分野で相変化による冷却が使われている。沸騰冷却の効率は空気空冷の約1,000倍であり、非常に大きな熱を奪うことができる。また、蒸発潜熱を利用するため、非常に小さい温度差で多量の熱移動が可能となる利点がある。

現在、沸騰・蒸発技術を使用した省エネ、CO₂削減に対する意義を検討している（図5-3-1）。化学プラント分野、電子デバイス分野を対象に考えている。例えば化学プラントでは、蒸留の領域や水素を使う場合のMCH（メチルシクロヘキサン）のプロセスにおいて、極めて高速な蒸気生成のニーズがある。我々はポーラス体を使って常温の水から数秒で400℃、500℃の蒸気を作る技術もやっているが、本日はその話はしない。

電子デバイス分野への応用としてはパワーデバイスがある。これは、自動車の電化に伴うもので、約1cm角当たり500Wの非常に大きな除熱をする必要がある。データセンターにおいても除熱は必須であり、現在は、ヒートポンプ、エアコンで25℃の空気を生成し空冷している。ヒートポンプによる空冷のエネルギーが、データセンターで使用するエネルギーの30%を占めている。データセンターの電力消費量が2030年から2050年にかなり大きくなることが予測されており、沸騰、相変化の原理を応用して外気から直接冷却ができれば、インパクトは非常に大きい。

そこで、例えば電気絶縁性流体にボードを沈めて冷却する浸漬沸騰冷却が考えられている。しかし冷媒が非常に高価で、環境負荷が非常に高いといわれている。これを水を使用した冷却にできれば、非常に安価に、また環境に負荷をかけずに冷却性能を高くすることが可能になる。水を使用する冷却を実現するには、絶縁膜の開発や沸騰冷却技術の開発が重要になる。

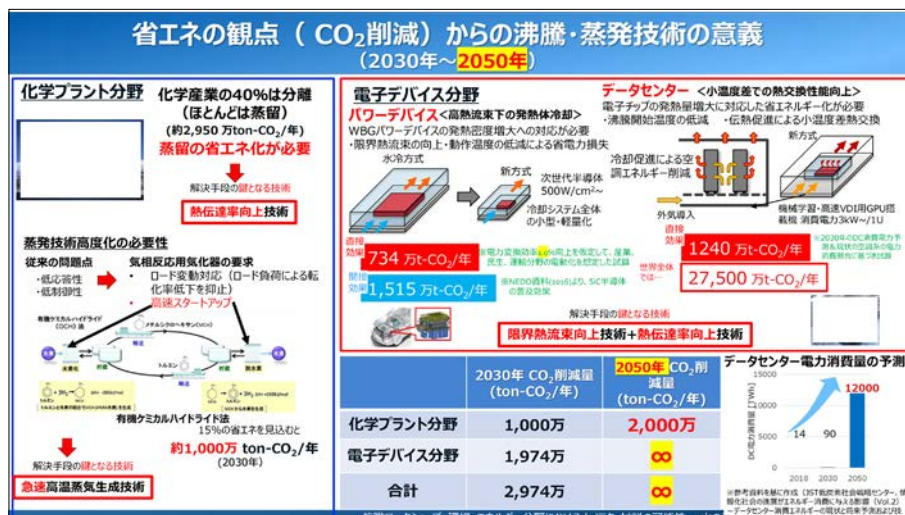


図5-3-1 省エネの観点（CO₂削減）からの沸騰・蒸発技術の意義

ここで、簡単に沸騰冷却の特性について説明する（図5-3-2）。後述する水電解の話にも繋がる。縦軸は単位面積当たりの伝熱量、横軸は加熱度（壁面温度と飽和温度の差）である。この状況で加熱量を徐々に上

げると、D点（極大熱流束点）で限界が生じ、D点を超えて熱量を上げると、F点に移行し1,000℃程度に急上昇する。F点は、膜沸騰域である。膜沸騰域では、ライデンフロスト現象が発生し、非常に伝熱導が悪い状況になる。したがって、この限界熱流束点をいかに上げるかは非常に重要である。さらには、同じ熱負荷の場合に、熱伝達率向上により線を緑の方向（左側）にスライドさせることができれば、温度差が小さくても同じ熱量を運べることになり、熱伝達率は上昇する。すなわち沸騰においては、D点を左上に動かすことができれば、熱伝達率の向上が期待できる。

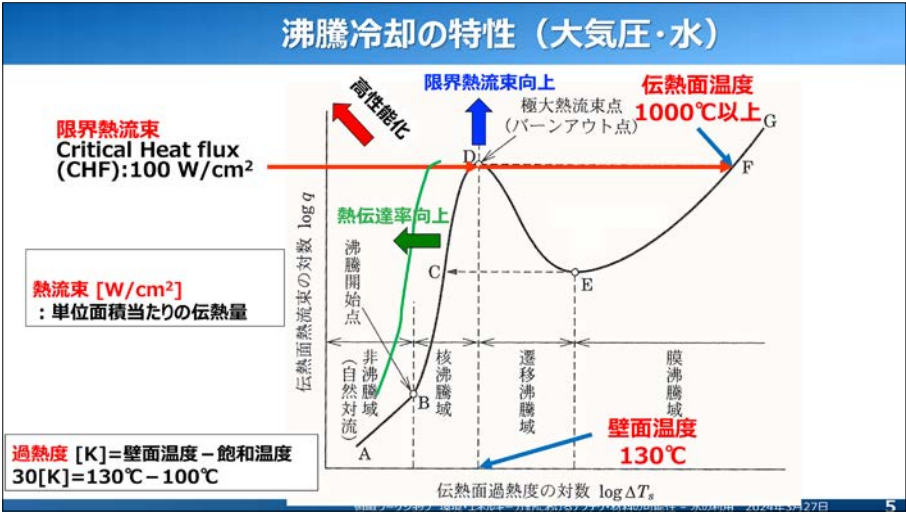


図 5-3-2 沸騰冷却の特性

高熱流束除熱技術ロードマップが日本機械学会から提案されている（図 5-3-3）。現時点で水の場合は約 1cm 角当たり 100W の除熱能力である。緑の線がトレンドを示すが 2022 年には約 1cm 角当たり 1,000W、すなわち指先くらいの面積で電気ストーブ 1 個程度の熱量を冷却する性能が求められている。この冷却性能の数値は、かなり大きな熱流束であるが、実際にこの程度の除熱ニーズがあるのが現実である。現状の水の限界熱流束を 10 倍程度引き上げる方法が求められている。

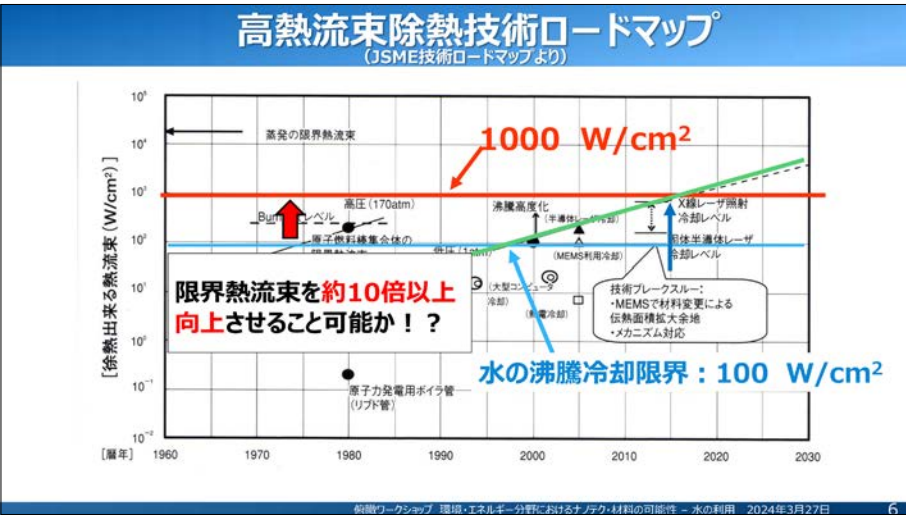


図 5-3-3 高熱流束除熱技術ロードマップ

世界的には、このような限界熱流束と熱伝達率（どれだけ小さい温度差で多くの熱を運べるか）の上昇を競っている状況である（図5-3-4）。先行研究を纏めてみると、いずれの報告も、何らかの表面加工を施して効果があったことを示していた²²。熱伝達率についても、概して表面にポーラス体を配置するなどの細工をすると性能が上がる。

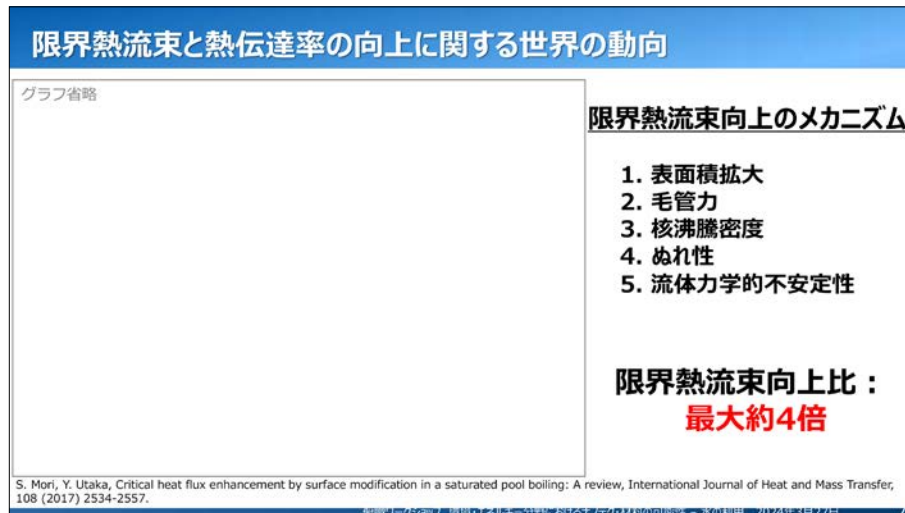


図5-3-4 限界熱流束と熱伝達率の向上に関する世界の動向

そのうち、表面の水をどれだけうまく吸うか、吸水性能が限界性能に大きく影響しているといわれていることから、今のトレンドとしては限界熱流束を上昇させる方法として毛細管現象を利用することが考えられている。例えば、細いパイプほど吸い上げ高さが上昇し、直径 $1\mu\text{m}$ 程度で、約10mまで吸い上げができる。多孔質体を使えば、毛細管現象を利用して水を供給することができる。一般にポーラス体のみでは効果が期待できないが、自動車の排ガス処理に使われるハニカムポーラス体を使用することにより、我々は効果が期待できることを見出している。このポーラス体には、およそ $0.1\mu\text{m}$ の穴が開いている。このようなポーラス体を発熱部の上部に配置し、沸騰している液体の中に入れると、配置しない場合と比較して3倍程度流束が上昇する。特に水の場合は、限界熱流束が特に上昇することが分かっている。

限界熱流束が上昇する理由は、ハニカムポーラス体の構造にある（図5-3-5）。ハニカムポーラス体は多孔質体なので、濡れ雑巾のような状態になっており、押し当てることで発熱面を冷却する。発生した蒸気を詰まらせずに、マクロのチャンネルから蒸気が抜け出し、界面では強烈な毛管力で自動的に液体を供給することになる。このような気液の循環を促進するような構造によって、限界熱流束がかなり上昇したと考えられる。また最近の我々の研究では、ポーラス体の内部の構造を制御すると限界熱流束と熱伝達率が上昇することも分かっている。

22 S. Mori and Y. Utaka, Int. J. Heat Mass Transf., 2017, vol. 108, 2534-2557

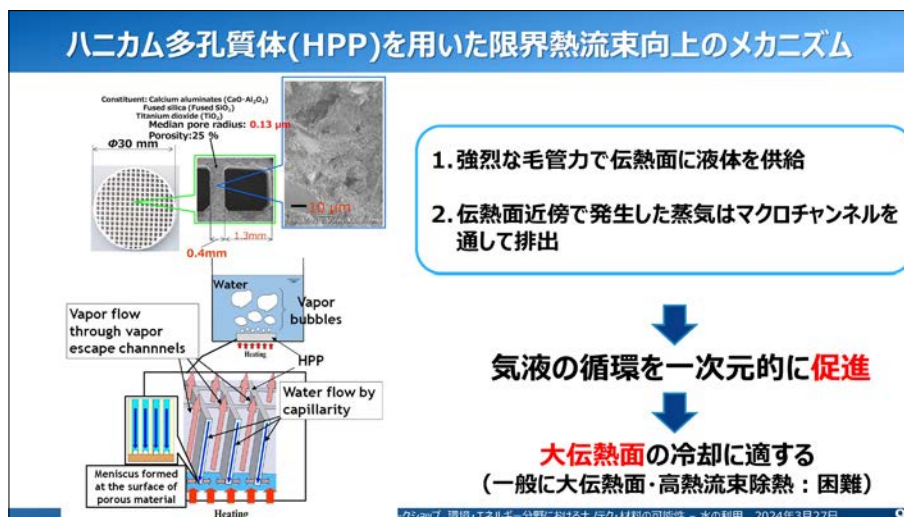


図 5-3-5 ハニカム多孔質体を用いた限界熱流束向上のメカニズム

沸騰の研究は、1931 年以降、90 年以上の歴史がある。この知見を他の分野でどう使えるかを考えてみる。熱と物質の移動にはアナロジーがあることが以前から知られている²³。前掲の沸騰曲線は、横軸に加熱度、縦軸に熱流束をとると、N 字カーブを描く。実は水電解の曲線も、横軸に電圧、縦軸に電流密度をとると N 字カーブになる。つまり、沸騰現象は、加熱量の上昇により伝熱面の表面に気泡が徐々に増加し、最終的には液体が供給されなくなり限界に到達する。水電解の場合も、電圧を上昇させると表面の気泡が徐々に増加し、限界に到達する。我々は限界点を上昇させる研究を進めてきたので、水電解でも同じことができないかと検討している。また、水電解（電気化学反応）の他にも、MCH（化学変化）、ギ酸、PEM 燃料電池などに応用できないか検討している。

伝熱の場合は、発熱している面から蒸気をうまく抜くことと、毛細管現象で液体を供給することで限界点を上昇させた。水電解の場合には、電圧上昇に伴い電極での気泡が徐々に大きくなり、液体の移動律速になっていたところ、電極にハニカムポーラス体を配置することにより、液体を毛細管現象で供給した結果、CCD（Critical Current Density）点が 1.4 倍程度向上したことが、既に報告されている²⁴。

以上のように沸騰現象にかかるメカニズムを解明し、他の電気化学反応や化学反応などに知見を応用できるのではないかと考えている。泡のアナロジーなので、我々はこれを「アワロジー」と名付け、研究を進めている（図 5-3-6、図 5-3-7）。

²³ C.W.M.P. Sillen *et al.*, Int. J. Hydrogen Energy, 1982, vol. 7, 577-587

²⁴ X. Wei *et al.*, Int. J. Heat Mass Transf., 2023, vol. 214, 124420

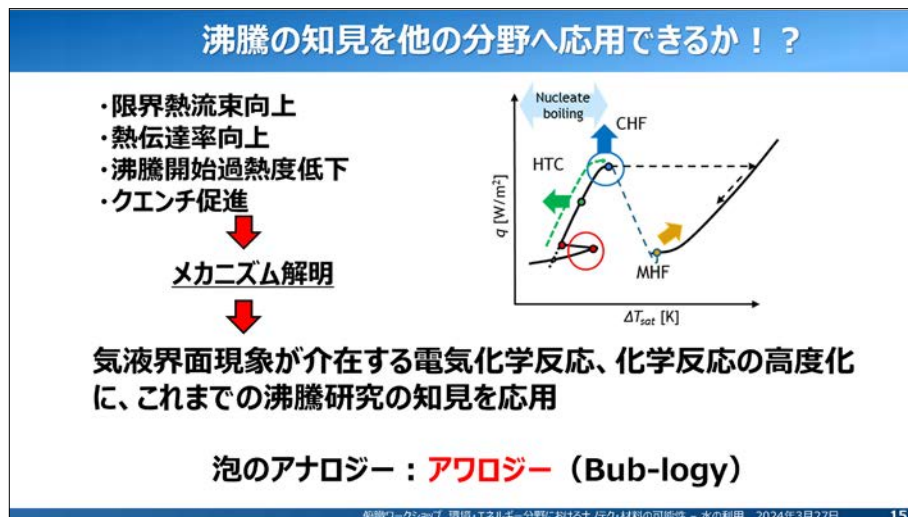


図 5-3-6 沸騰と水電解の間の類似性

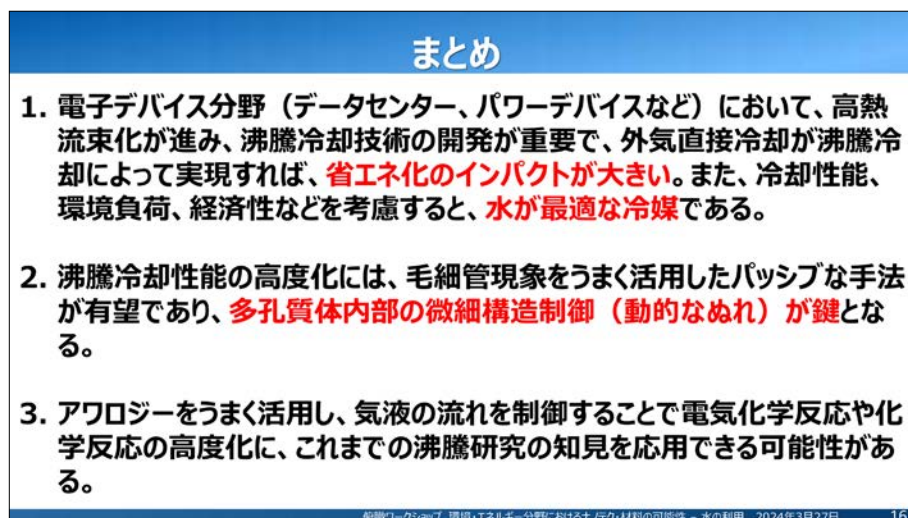


図 5-3-7 まとめ

5.4 セッション討議

Q：質問、A：回答、C：関連意見・コメント等

【水電解について】

- Q：ドイツのプロジェクトでは各種水電解を手がけているとのことだがHORIBAがSOECに参画された理由は何か。
- A：とりまとめをしているSunfire社から声をかけて頂いたのが参画の経緯。
- Q：SOECは高温の蒸気を必要とするのになぜ色々な会社がプロジェクトに参加しているのか。
- A：指摘の通りSOECでは熱のマネジメントが重要である。対策としてその後段の化学プラントとセットで使うことも想定されている。後段のプロセスで出てきた発熱反応の熱を吸熱反応のSOECに戻して熱循環させて使うなどの検討が行われている。
- C：SOECに対する別のアプローチとして、アカデミアサイドとしては、より低温で動作する固体電解質の開発がキーだと思われる。しかし大幅な温度低下は容易でないのが現状である。

【ウルトラファインバブルについて】

- Q：核発生、核成長の制御の際になぜバブル同士がぶつかって成長しないのか。自由エネルギー的にはある程度大きくなったほうが良いと思うが。
- A：超高純度の中性の水中には水分子、水酸化物イオン、プロトンの3種しか存在しない。コロイド科学の世界では、気液界面には水酸化物イオンがプロトンより高濃度に集まるとされている。そのためゼータ電位計を用いれば、ウルトラファインバブルを取り巻くすべり面ではマイナス30ミリボルト程度に帯電していると実測できる。マイナスに帯電したウルトラファインバブル同士は非常に接近した時には静電反発力が働き、合体は起こりづらい。
- Q：もしもくっついて大きくなることができたら、表面積の点から熱力学的には大きくなった後のほうが安定となるのか。
- A：そのとおりである。ゼータ電位による反発力はそれほど大きくないため、例えば超音波照射などの外力で無理矢理合体させ浮力を持たせるとともに安定化させ、浮上分離させる脱泡技術がある。
- C：コロイド界面化学で解き明かされていない一つの謎は、なぜマイナスになるかということ。水の構造と関係あることだと思うが、なぜ泡の表面がマイナスになるかということについて答えは出ていない。
- Q：泡の内側の圧力はマイナス（負圧）か。それともプラス（高圧）か。
- A：泡の外圧に、有名な古典理論であるラプラス圧で加圧されるため、泡の半径に反比例して2倍の表面張力分だけ内圧は外圧より高圧である。京都大学ではファインバブルの内圧をSpring-8を利用して内圧が20～25気圧という計測データを得ておりさらに議論がなされている。泡の周囲圧よりマイナスの議論は無い。
- Q：圧力の測定について、例えば一旦水を凍らせてから溶かしていく時に気体が出てくるが、泡の数と量が決まっていればそこから計算できるのではないか。
- A：容器内で凍る現象は、水相の外郭から熱を奪われて氷結晶が内部に押し寄せるため、内部の未凍結水に気泡群が圧密されたスポットができ、合体が起こってしまう。未凍結水中にも、水中で泡になれなかった過飽和のガス分子が溶けている。もし減圧して脱泡すると水蒸気（ガス）になった水分が加算されノイズとなり、実際には計算は難しい。
- Q：ウルトラファインバブルの内圧が20気圧というのはかなり大きい圧力なので、もしウルトラファインバブルが弾けると、ほぼ全部がバブルになるのではないか。
- A：20気圧のウルトラファインバブルが弾けると、1気圧の大気泡になり浮上しそうだが、まずいったん水

- に溶けると思う。また通常のウルトラファインバブル水では、ウルトラファインバブルと最寄りのウルトラファインバブルとの距離は十分遠いので、2つのウルトラファインバブルの合体はかなり確率的に難しい。
- Q：固体粒子だとゼータ電位をプラスからマイナスに変えることもできるが、気泡の場合も変えられるのか。
- A：気泡は、固体粒子と異なり、内部の物質量はすごく少ないため、物性の変化はおおむね液側の分子が支配する。例えばpHを変化させる。pHを変化させ水酸化イオン濃度をリッチにすれば、気泡のゼータ電位はマイナス30ミリボルトが、-40、-50ミリボルトと変化する。ゼータ電位の等電点はpH3あたりにあるのでもしpHを2にすればゼータ電位がプラスの気泡を調製できる。
- Q：ウルトラファインバブルは直径100nm程度ということであるが、うまく操作することで様々なサイズのものが作れるのか。例えばオゾンを入れたときに、ラジカルの生成量や効率が大きさによって変わるのではないかと思った。
- A：今日は都合によりウルトラファインバブル粒径分布データを持ってきてないが、水-空気系では最頻径はおおよそ90nmである。両端に富士山のように裾野をもつきれいな単峰形サイズ分布をもつ。数百nmのウルトラファインバブルが一時的に生成しても、浮力発生に伴って浮上離脱して無くなり、数nmのウルトラファインバブルが生成しても再溶解して消滅し、疑似平衡的に90nmにシングルピークを持つ分布になると推察されている。疑似平衡サイズには表面張力の影響が多少あるものの、ウルトラファインバブルの製造方法が異なっても空気-水系なら面白いことにおおむね80~100nmに単一ピークをもつ分布になる。
- Q：農業応用の話があったが、水素のバブルが入った水には、いろんなラジカルがあり、植物の成長に役立つといった発表をアメリカの学会か何かで聞いた。直接電解で作った水素を、直接農業に応用するという可能性や、そういう研究はないか。
- A：私は農学系ではないので明確に答えられないが、農業応用に水素の入ったウルトラファインバブル水が効くとする話は、おそらく活性酸素を水素で還元する可能性を示唆していると思う。別途、薬学系応用では、水素の入ったウルトラファインバブル水を口腔飲用して大丈夫という結果が出ている。水電解による水素でウルトラファインバブル製造は可能である。先に仮説で述べたように水中ガス過飽和度はウルトラファインバブル生成の必要条件とて言えば、水素は酸素や他のガスに比べると水への溶解度が極めて低いので過飽和が容易なガスである。実用化されている水素ウルトラファインバブル水は、加圧水素ボンベからバブリング等を経て作っている。電気分解では酸素と水素の再混合による爆発を嫌わなければ可能性は十分あると思う。
- Q：農業応用で泡が入るとよく育つのは、直感的に電荷によってイオン交換を促進してるからではないかと思う。活性酸素や衝撃圧によって植物が育つといった説明には懐疑的である。泡がマイナスイオンを持っていれば、ポジティブイオンの養分を引きつけ、それで植物が成長するように思えるが、そのような説明はあるか。
- A：その辺の検討はすでに進んでいる。泡の持つ性質は負電荷だけでなく疎水性相互作用もある。例えば、肥料や農薬の一部はコロイドであり、泡がこれらのキャリアとなって植物の根の付近に運べる。濃度の薄い液肥でも、泡表面に濃縮されて疎水性の根の表面に運んでいるとの説がある。一方、植物が育つには酸素も必要なので、空気ウルトラファインバブルを肥料溶液に混ぜて使う試みもある。ちなみに麦をウルトラファインバブル水にひたして麦芽が出る確率は、普通の水に浸した場合よりも圧倒的に高いことが実験で分かっている。多数の麦粒の中には発芽しにくい不良品もあるが、ウルトラファインバブルに起因するキャビテーションやラジカル生成などの刺激が発芽の目覚まし時計として働いている。発芽率の向上は、苗の生産量も良くなることは明らかである。農業分野だけでさえ、このように様々な機能が複合的に適用されている。

【沸騰冷却の性能限界】

- Q：沸騰冷却の性能限界を一桁上げることが目標になっているが、まだ4倍にとどまっており、その限界を決めているのは何なのか。水の供給なのか、泡の排出なのか。
- A：それは毛管限界モデルで大体説明できる。毛管力で引っ張る力と、ポラス体内を通過する時の液体の圧力損失、蒸気が抜ける時の圧力損失が釣り合う時に、およそ限界に到達することが大体分かっている。そのため、ポラス層をうまくコントロールして、限界が10倍上げられる構造が作れば、限界はさらに上がると考えている。まだ余地がある。

6 | セッション4：総合討論

Q：質問、A：回答、C：関連意見・コメント等

【各セッションに関連した質疑応答】

<濃度差発電>

Q：濃度差発電についての質問です。濃度差による浸透圧でタービンを回すほどの水のフラックスが出るのか。

A：膜の面積のデータはないが、実験室でやるとおそらく小さいので出てきても大した水量ではない。実施では極めて大きな膜面積になる。設計上の容量だと1日当たり使用する下水量が1万m³くらい。ポテンシャルとしては5万トンまで行ける施設だが第一期はまず1万トンでやってみて、うまくいけば増設するということになると思われる。

C：タービンを回すとなると単位時間あたり結構な流量が必要になると思われる。

<大気造水（AWG）>

Q：AWGはどれぐらいの速度でできるのか。相対湿度20%くらいの大気から水を取るわけだがその状態を保ちながらできるのか。

A：気象・気候の状況による。また造水する量が少なければそれほど問題はないが、ある程度の量、例えば1日10m³とか20m³という数量を作ろうとすると、大気中から取るわけなので徐々に乾いてきてしまう。そこでの空気の流れなども含めて考えないといけない。

Q：相対湿度20%なら20%で、その状態がずっと保たれるように大気がうまくそこへ来ないといけないのではないか。

A：大気はコントロールできないので、どこかの地域でやろうと思えばまず気象の変化等を考えて、例えば午前中、海沿いだったら海から来る風が流れているようなところでないと風がなくて淀んでいるところではおそらく使えない技術ではないか。

C：砂漠の真ん中だと難しいのかなという気がする。

C：シミュレーションで実験したことがあるが灌漑までやる程のレベルでAWGを実施すると周りの水を吸い取って、水が足りなくなっていて、そこまで効率的ではないことが分かった。

<ファインバブル>

Q：実験室でやる時は水槽の中で均一にウルトラファインバブルが作られているような実験が多いと思うが、ウルトラファインバブルは浮上しないである一定期間滞留すると水の比重は下がるのか。

A：体積%で言うと0.0001%なのでほぼ無視できる。よって比重は変わらない。逆に言うと比重が変わるくらい入れられたら良いが、入れられる最大の濃度が体積%ではとても無理で、個/mLでしか今は議論できていない。

Q：1mL中何個ぐらいあるのか。

A：市販の機械で確実に取れそうなのはだいたい1cc当たり一桁億個位である。

Q：体積で言うとどれ位か。

A：体積は私はいつもN/Dと言っている。発表資料の図はデフォルメしており実際はずっと小さい。10の8乗、10の9乗ぐらいが普通に作りやすい数（個/mL）。よくする例え話は体育館にバスケットボールが2個と言っている。そのぐらいの感じなので複数のウルトラファインバブルはなかなか衝突しづらい。

Q：質問の趣旨は、例えば水を処理する時、水を色々な形で攪拌したり動かしたいが、今まではポンプを使ったり攪拌機を使っていたため非常に効率が悪い。もし比重が変わるぐらいウルトラファインバブルを入れられるとすると、少量のバブルを均一に混ぜることで機械攪拌のように大きく強くは混ざらないがゆっくり攪拌するのでも良いプロセスもあるのでそういうところで活用できるのではないか。

A：今日はウルトラファインバブルのみに話題を集中したが、ウルトラファインバブルより大きいファインバブルであるマイクロバブルがまさしくそれに使える。1ミクロンから100ミクロンぐらいの泡を作るのはもっと簡単な技術でできる。私たち化学工学の世界では気泡塔のエアリフト効果と呼んでいる、気泡が入っている領域と入っていない領域の見かけの比重差を利用して、どのぐらいの水量が対流を起こすかを計算可能である。

Q：それは実際に実験もやられているか。

A：実験もやられている。我々としては前世紀の古い技術との認識。

Q：どれぐらいの水量がやられているか。

A：規模にもよるが工業的には化学プラントでもエアリフト気泡塔が使われているし、現在でも排水処理など色々なところで実用化されているものが沢山あると思う。おそらく名称としてマイクロバブルとは言っていないが、曝気（ばっき）槽やディープシャフトなどと呼ばれている機器が該当する。

Q：例えばオゾン処理をする時にディープシャフトがあるがあれは筒の中にファインバブルではなく大きな空気の泡を入れる。

A：大きな泡は実際には内部で分裂している。とくに大きい泡は非常に不安定なので内部の液のせん断流によって粉砕されおおよそ5～6mmの安定サイズになって上昇している。ディープシャフトの場合は深さ10mぐらいあるので水圧で加圧された状態で上がってくる途中にだんだん膨張するが、不安定化に伴い分裂するため、結局、安定径に落ち着く。

Q：そうすると浮上する力で上がっているということか。

A：そのとおり。上昇速度をざっと計算したい時は平均密度差で計算する。しかし実際には大きいバブルは笠状になり後ろに水を引き連れて上がる（ウェークと呼ばれる）ので、つまりミクロに言うと泡が水を引き連れて上がり、マクロに言うと泡のいるところといないところの比重差が上向きの力、水と管壁の摩擦が下向きの力としてほぼ計算できる。これは気泡塔研究の分野では古典的な知識である。

Q：ファインバブルは入っていないのか。

A：ファインバブル、いわゆるマイクロバブル、を入れるとなると5～6mmよりもはるかに小さく、上昇速度ももっと遅い。ウルトラファインバブルに比べてとても濃厚に入れることができるので、多少エネルギー使ってもよければディープシャフトにマイクロバブルを適用すれば反応効率は上がる。

C：用途次第と感じた。

A：もし比重差を利用される時はウルトラファインバブルではなくマイクロバブルをおすすめする。

<貯水槽中の水の冷却>

C：中東や沖縄では水はすくってすぐに蛇口から出るのではなく必ずどこかで貯めている。貯める時、暑い地域はどうしても温度が上がってしまう。中東では水は海水淡水化で作っている。海水淡水化した水は日本ならば水道局側が極めて大きな配水池を持ってそこに貯めて配るわけだが、なぜか中東のほとんどの政府はそういう責任を持たず、各家庭に貯水池を設ける形にしている。サウジアラビアやUAEではそういう規定になっている。

家庭ではだいたい屋上に貯水槽を作るが、そうするとものすごく温度が上がってしまう。シャワーを浴びるのに60度位の水が出てしまうため使えない。そのためせかくの水をまずは流し捨ててしまう。水を一回捨ててその後の水を使う。

建築基準のようなものがあって設備は作らなければいけないものの貯めること自体が水の無駄遣い

になっている。海水淡水化が止まってしまうなどの非常時には日本ならば水道局側が何とかして水を供給するが中東の国はそういうことに一切責任を持たず自分たちで何とかしろという考え方である。

地下に貯水施設を作るのは彼らはあまり好きではないようで、水は安いから捨てればいいという考え方である。水道料金を取っていないからだ、国としてはものすごい無駄遣いをしている。

昔は沖縄もそうだったが今は海水淡水化プラントができたりして安定給水にしたため屋上の貯水槽を作らなくてよかった。しかし海外ではそういうところが非常に多いので温度をシャワーが浴びられるぐらいにまでコントロールできるとその技術は非常に使い勝手が良い技術になるかもしれない。

C：イランの文化ではポーラス状の陶器が昔からある。ほんの僅かだが染み出すためその中の水温はある程度一定に保たれる。そういうのが普及すると今のような無駄遣いは少なくなるかもしれない。

C：アフリカにもそういうものがある。素焼きに水を入れている。ただしあれで冷却できるのは少量である。

C：可能なはずだが通気性にもよる。また、上からの日射だとすれば、上にアルミホイルでも置けばかなり防げると思われる。うまく解析すれば対策が出てくる気もする。

【総合討論】

<全体所感>

C：水の現象は、滝沢先生の基調講演にあったように地球レベルの話から非常に細かいレベルまで色々な見えないといけませんが、今回のワークショップは水そのものを利用する話と水の機能性を利用する話で整理している。機能を発現する、例えば除去するという時に材料が使われるとか、水の機能に更に高付加価値をつけるためにナノテクノロジーが利用できるという話が網羅的に出てきた。その中で改めて感じたことは、理論的な現象は面白いが、實際上、水利用する場を考えると、工業で超純水を使えば良いが多くの場合はその水に夾雑（きょうざつ）物などの共存物がある。場合によってはコロイドがあるかも知れないし、溶けているものや固体もあつたりする。その辺をどう乗り越えて、純水で機能することが実際に利用する水においてどのように適用できるのか、頭の整理が必要である。実験室で得られるきれいな状態、あるいはコントロールされた状態での理論はそのままでは実際の水利用に適用されにくいと思われる。しかし、一方では、工学的、経験的にこんなもので良いでしょうという実務からブレイクスルーするためには、細かいんだけどそれらの理論的な情報をうまく適用できる場所を見つけていくことが一番大事であると感じた。

その他、沸騰の話とファインバブルの話は一緒にならないのか、あるいは濡れの話と別のところが繋がっていくのではないかなど幾つか感じた。具体的にどういう研究すれば良いかは分からないが処理だとかそういうところではない基本的なところで、かなり繋がりがあっていいのではないかと感じた。

<沸騰、水電解、ファインバブルの共通点>

C：泡の話に関連して、水電解は研究室レベルでは電流密度が非常に低くて泡はちょろちょろと出るくらいのことだが、実際は1A/cm²といった非常に大きな電流密度が求められる。そうすると泡が沢山出る。泡がきちっと電極から離れないと、その部分は電極としては機能しなくなるので、スムーズに泡が離れるようやっとなければいけない。それは沸騰とは違うが、泡の脱離という観点では似たようなところがある。「エネルギー高効率利用と相界面」というJSTのさきがけ領域でも議論はあったが、いわゆる沸騰と水電解の泡発生、先ほどのファインバブルもそうだが、発生した泡が成長することなく、うまく表面から脱離していくということは、エネルギー変換の分野でも大事であり、異分野の人をうまく巻き込まないといけないのだと思う。泡をどうするかとなると電極表面の形状コントロールなども重要になる。

C：そこの取っかかりというのか、今日少しインパクトがあったのは、水っていうのが色々な形を持っているという、今までわれわれが想像してきた1つの種類じゃないという、相手とのインタラクションでいか

ようにでも変わり得るというところ、そこが一番の起点になるような気がした。そこが分かれると沸騰あるいは電解、その現象が化学反応のところまで繋がるような気がする。

ただし、塩見先生が発表で言われたように、その繋ぐ時ですら、まだ課題が多い。分子、原子レベルから連続体までの繋ぎというのが、全くまだ、我々見えているように見えていない。その辺のところが繋がると今日来ていただいた方々ほとんどが繋がるのではないかな。

C：水電解と反対方向の反応である燃料電池については、逆に水素と酸素が反応して水ができてイオン交換膜の中へ入っていく。SOFC（固体酸化物形燃料電池）もあるが普通の燃料電池でも水がある程度ないとイオン交換膜の中で伝導度が出ない。1950年頃に書かれた燃料電池の本でも既に三相界面という話は出ているが、そこからどれだけ進んだのかというところは気になる。

C：東大・高鍋先生と某プロジェクトで一緒になって水電解の泡発生論文を発表したことがある。我々がやっている濡れ性制御と高鍋先生がやっている電極エンジニアリングで、我々は先ほどお見せしたフェーズフィールドのシミュレーションをやった。出会うだけで成果が上がるみたいなことがあった。今日の話も恐らくそうだと思う。

先ほどの屋上の貯水槽の話も、伝熱屋が伝熱システムとして取り組んで、熱交換器をエクストラなパワーなしで普通にキャピラリーでいくようにできれば比較的安くできるのではないかなと思う。異分野の方々が出会うだけで色々なことができると思う。

一方で、私は「相界面」領域にさきがけ研究者として参加していたが、相界面という設定はすごいなと思う。こういう場に来ると、結局相界面の領域なんだと思う。だが当時、化学系の人や機械系の人など色々な人が入ったが、じゃあそこで分野を超えた横断的なすごい大きな成果があったかっていうと、もちろん共同研究に発展したものはあったが、もっと大きな流れを作れたのではないかなというところもある。あるところで出会う、あるフェーズで出会うとすごいまくいのに、構えて出会うとそうでもなかったりという、その辺の方法論のところの一つ発明が必要なのではないかな。

C：泡についての研究は沸騰の分野の狭いところに入っているが、共通項を見つけて、仲間が見つかって、材料屋と異分野の研究者が融合できて何か新しいブレイクスルーが生まれると面白い。

<界面領域を扱う学会>

Q：動的濡れはアメリカの物理学会だとセッションがパラで進むほど注目度の高い分野だが日本ではあまり発表が見られないという話があったがなぜそういう状況なのか。

A：アメリカは、アメリカ物理学会（APS）にDFD（Division of Fluid Dynamics）という部門があって、多分APSの中では一番大きな部門の一つである。学会をやると6,000人位来る。その中でダイナミックな濡れ性も含めてメインピックの一つとなっている。おそらくNIH（国立衛生研究所）など医療系のファンディングを受けている人たちも入ってきており、お金も入ってきている。フィジックスとしてもリッチなため流体力学分野の人たちの一つのポピュラーな行先となっている。

科学としての深みからしても先ほどからご議論いただいているようなニーズからしても日本でももう少し広がるべきではないかなと思うが、日本では基盤となる学会がないとなかなか広がらないというところがある。その界面領域をどこの学会で議論するのかみたいなのところがある。伝熱学会で2～3年前から濡れのセッションをやっているが伝熱学会に限らず今までどこで発表していいか分からなかったという人が結構入ってきている。更にそれを今、混相流学会に持ちかけて、ボトムアップ式で学会を融合して有志でやっている。しかしまだ規模が大きくないので、ボトムアップもいいが、トップダウンで何かあると良いというのは常々思っている。

C：私は農業土木という分野でコロイド界面が重要だということでやってきた。実際には化学会にコロイドおよび界面化学部会というのがある。高分子学会にも研究会（例：高分子表面研究会、高分子と水・分離に関する研究会）などがある。油化学会にも界面科学部会がある。土壌物理でも界面をやっている。

るが、環境をキーワードにその人たちが一堂に集まる機会は実のところない。IAP2008を開催した当時はたまたま国際会議という場を使って縦割り性をうまくクリアできたということがあって、それで情報が広まった。界面科学はある種のインフラではないかという感じがあるが、日本では色々な分野に共通するいわゆるエンジニアリングサイエンスというコンセプトがまだアメリカほどないのではないかと。

流体の学会に行くと本当に何千人とアメリカの研究者がいる。生体に関する流体などもある。「Journal of Fluid Mechanics」のテーマも本当に幅広いと思う。一方で日本はバラバラになっている。そのため基盤的なインフラであるということをもう少しどこかで考える必要があるのではないかと気がする。

<メゾスコピック分子シミュレーションと実験>

C：かつて電気二重層の研究をしていたが、電気二重層の研究というのは割とマクロな話でコロイド学のようなところから原子レベルの1個1個の個性を見ていくところまである。そのような中で今まで多くの研究者が量子化学に進んだ。私もメーカーにいたが、メーカーの多くの化学系エンジニアは量子化学者で、量子化学計算をする。それは赤外にしても、ラマンにしても、NMRにしても各種スペクトルの解析と量子化学計算が合うとの考えから。そこではMD（分子動力学）はそこまで重視されていなかった。ところが水のサイエンスになると、「水が水和する」や「第〇水和圏」といった言葉があるように、ある程度分子集団としてきちんと議論しないと話ができないところがあるため、水にはMDが大事であるとかと何となく皆さん思われている。

そうした中、最近では、東大・加藤先生が代表の新学術領域「水圏機能材料」のアカデミア・インターンシップという仕組みにおいて、実験系で水圏材料の合成をやっている若手の人たちに我々のところに来てもらってMDを教えている。その結果、MDを学んだ人たちが実験にMDを取り入れるようになってきている。材料設計にMDを使うというのは今まで意外とありそうでなかったが、水というテーマを通してできるようになった。有機化合物を作る際にきちんとした量子化学計算をするっていうのは今は当たり前にあるが、それに加えてここ5年、10年位でMDも実験屋のラボに必要なだよねという流れが大学、メーカー問わず見られるようになってきたのは良い傾向だと思う。

C：日本は第一原理計算はものすごい強く、人も多い。しかし昨年蓄電池関連事業の関係で英国の蓄電池の研究開発状況を調べて回った時に、マルチスケールシミュレーションとか大きいサイズのシミュレーションをやっているグループがものすごい多かったことが印象的であった。日本にもこれらの領域の先生方はおられるものの、そこにおけるボリュームはまだまだ圧倒的に少ない。DFTや量子化学計算といった厳密なことが好きな人が多いのかもしれないが、マルチスケール、大規模シミュレーションなどの領域を今後どうやって強くしていくかが課題である。蓄電池にしても燃料電池にしても何にしても、小さいところから大きいところまで持っていかなければシステムにならないが、その全体を見るような化学工学的なところが弱いような印象を受けている。

C：水についても総合的に見る力が必要なのではないか。細胞の中の電解質の研究は生命の本質に迫るものだが研究者は少ない。解かなければいけない問題だが、強電解質の理論は解けないから解かないとなっていた。みんなは解ける問題を解いている。解ける問題ばかり解いてるので、結局解けない問題に入っていない。そういうスタンスを誰かが破らないといけないと思う。暗闇で誰か鍵を落としたとき、本当は暗闇の中に鍵があるのに多くは電灯の下だけ探しているという、そういうようなファイマンの言葉があるが、小さい光でいいから暗闇を照らすようなブレイクスルーをみんながつくるような活動をするのが重要である。

C：おっしゃるとおり。今後は第一原理ではないような計算でも日本がどうやって自信を持つかということだと思う。文科省のデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト（DxMT）で東大の山田淳夫先生が電解質をやってらっしゃって、最近出たネイチャーエナジーの論文ではMDをやっておられる。

山田先生は実験屋だが、特任講師の先生でMDができる方が中にいる。MDで電解質計算して、それを基にそこから抽出した知識を使って展開するというストーリーになっている。

MDを何年もやっている中で、最初はクラシカルポテンシャルじゃないか、レナード・ジョーンズじゃないかとすごい言われ、共有結合ができるようになるとそれはそれで第一原理とベンチマークしたのかと言われてきた。しかし僕らとしては巨大系メゾスコピックに行くためには精度を犠牲にしなければいけない。その時にここのエッセンスが重要だからここを取りに行くっていうのを決めながらやっていくが、最終的にはそれを実験でアンカーしなければいけない。今は計算機の性能も上がって20年前よりは相当色々な計算ができるようになってきた。加えてデータ科学もあり、実験屋が見てくださるようになっている。そのため、実験でアンカーされるメゾスコピック分子シミュレーションというのは、一つすごくいいアングルなんじゃないかと議論を伺っていて感じた。

- C：MDが普及してきて多くの方が使えるようになってきて素晴らしいと思う。例えばコロイドについて、基本的に水処理時は凝集剤を入れて全部大きくするので、水処理分野ではコロイドがどう動くかはあまり考えてこなかった。凝集剤をどんと入れて取れば良いという発想だった。ところが、例えばウイルスは20～50ナノぐらいのレンジにいるが、凝集しなくはないが凝集しにくい。普通は99%くらい取っておけばあとはそれほど問題にならないが、ウイルスだと5ログ、6ログの除去を求められている。それだと凝集だけではなかなか取れず、どうしても膜の中に入ってきてしまう。膜の中に入ってきた時にどういう挙動をしてどう取れているのかということについては、MDでやるには大き過ぎ、我々がやるようなCFDシミュレーションでもカバーできておらず、MDとCFDの間のスケールの部分が抜けている。しかし今の時代はそこの部分を何とかする必要があると思う。

多孔質の膜は公称孔径0.1ミクロンといっても実際に0.1ミクロンの孔が開いてるわけではなく、微粒子が90%取れる粒径を公称孔径と定義しているだけであって、実際はもっと大きい孔が開いている。それが何層も重なっているから結果的にそれで取れているというだけである。では違う微粒子の大きさになったら、たとえば20ナノと50ナノの粒子では膜内部での挙動がどう違うかというようなことについては我々はそれほどしっかりとした知見がなく、大きいほうが取りやすいだろうという、それぐらいの知見しかまだない。それはなぜかと言うと、膜細孔の中での微粒子の挙動がしっかりと解析できていないからである。そのため、我々がやってきたCFDによる水の流れベースのシミュレーションとMDの間に、昔から知られているようなブラウン運動をどうやってシミュレーションするのかというようなところにリサーチギャップがあり、これからはそれも重要になってくる。水処理としてはこのサイズに色々な汚染物質がある。ナノ粒子を使って光触媒をやるにしても最後は光触媒を回収しなければならない。その時には膜で回収するのが一番合理的だが、どういうデザインの膜が必要なのか、どういう効率なのかを知るためにはナノレベルの粒子をどうやって除去したり回収したりするかの知見を持っていなければいけない。しかし我々のところには今十分なツールがない。リサーチギャップだと思う。

- C：そこはまさに凝集の分野である。流体でもテイラーなんかやっているやや大きなスケールの流体。膜の後処理する時にはやはり凝集が必要になる感じがする。微生物の問題も微生物がいかに凝集しないかという戦略のところを見る力が必要。ここは大事なところだと思う。
- C：シミュレーションについては私の資料に任せさせていただいた流れとブラウン運動のカップリングを鋭意進めている。科研費もいただいている。
- C：大変本質的な議論。ここ20～30年で日本の科学や工学の世界ですごい減ってしまった人種がいると思う。それが多分モデリング屋だと思う。いわゆる数式で現象を表現する人たちというのが極端に減っているのではないかと危惧している。さきほどの話はシミュレーションベースだと辿り着かないところがあるという話だった。そこを当時、例えばハイブリッドみたいにして有限要素法とMDを両方解くといったこともあったが、最終的には境界条件として入れていくしかないという認識になっていった。そのモデリングの技術は本当にセンスを問われる話であり一朝一夕で育たない。そういうモデリング

の人たちが評価されない冬の時代があった。そういう時代に日本では結構淘汰されてしまったが、中国ではなぜかそういう人たちが地味に育ってきており、それが今相当ジャブのように効いてきている。特に機械系の力学のところではそういう印象を持っている。そのためJSTからヒアリング等を受けるたびにモデリングの領域を立てたほうが良いのではと常々申し上げている。そこが本当に結構ダメージを食らってしまっているの、復活するには10年規模でかかると思っている。まさに先ほどおっしゃったような、つなぎのところのモデル化が肝だと思っている。

モデルと実験の両方が必要。モデリングは実証しなければいけない。先ほど分子シミュレーションを実験でアンカーすると言ったが、モデリングというのは昔から、特に流体力学は、フランスの研究者は今でもそうだがスマートでシンプルな実験をして、それを簡単なモデルで表現するというのを伝統的にやっている。日本でも元々そういう人達は沢山いたが今は少なくなった。

C：コロイドやブラウン運動の世界でもそれが顕著である。

C：フロックの研究はデバイスから全部自分たちで作るような感じでずっとやってきているが、他では何となくそういう人が少ない。フロックの透水性の理論でも、透水係数をどう考えるか等、その部分が抜けている。

<産業における水利用>

Q：水電解における水需要について、気候変動は水電解装置や方式の選択に何らかの影響を及ぼすようなこともあり得るのか。地域によってこういうものが好まれるだろうといった地域差が出てくる等、水需要についての将来見通しで何かご意見あればいただきたい。

A：そもそも電解槽はどういうタイプがいいのかという話がある一方、いま欧州では塩水のプロジェクトがかなり立ち上がってきている。海水を純水化して供給するタイプもあれば、ダイレクトに持ち込むタイプもある。地域に応じたものが出てきているのだろうが、今後も恐らくどれか1つに絞るというよりは、色々な用途によって使い分けていくことになるのではと思う。

水、特に純水はいま足りていないため、海水を純水化して使ったり、工業廃水をもう一度きれいにしたりといったことが今後取り組まれていくだろうと思う。その際に生態系とのバランスみたいなことも今後は必要になってくるのではないかな。例えば色々なイオンを除去した水を海に戻した時に、無機系のものはそれでいいのかもしれないが、微生物がかなり存在しているものはどうするのか等、生態系を見ていくとまだまだ課題というか、取り組まなきゃいけないことは結構あるのかなと思っている。

C：本日送られてきた英国Royal Society of Chemistryからのニュースでwater sustainability in industriesが取り上げられている。まさに今言われた海水について、濃縮された海水を戻すのが問題だと指摘されている。アルカリ水電解には強電解質を使うが、工業的には純水を作ってそこへアルカリを入れている。その処理をちょっと緩くできないかといった研究も行われている。海水の場合、先ほど言われたように有機物をしっかり除去しておかないと電解槽の中に藻がわきかきねないし、スケールが出る等のこともあるため、RO等を組み合わせた水処理により清浄化しているのが現状と思う。

<横断的な取組のための評価軸>

C：水を改質するのはお金さえかければいくらでもできる。しかしどのぐらいのお金をかけてどのぐらいの処理をやるかというのは恐らく人ごとに異なるためなかなか話がかみ合わないところもある。必要な学理や技術も恐らく違ってくる。水はタダみたいなものだと思っているところもあれば海水から作らなければいけないところでは水はそこそこ高いものだという風に意識の違いがある。それぞれに応じた科学や技術を使わなければいけないのだろう。今回の議論で言えば半導体グレードの水を作る人と工業用水を処理する人たちの間で共通の会話を成り立たせるものが見い出せると世界が広がっていくのではないかなと思った。

- C：精製や除去のコストもそうだが、今の雰囲気と言うと、それを製造するためにどれだけ電気エネルギーを使うのか、薬品を使うのかというLCA（ライフサイクルアセスメント）的な観点も必要。コストは比較的评价しやすいがCO₂をどれだけ出すか等の評価が曖昧なままだと偏った技術開発をしたり偏った生産技術を考えるので、その辺は整理したほうが良いのではないかな。社会の中でサステナブルな水利用を考える際には、その概念を社会科学的な部分も含めて整理しておくことが重要ではないかな。こういう価値を生み出したものがこれだけの価値があるのでこれだけの対価を払ってもいいですよという整理ができないとそれぞればらばらに「いい技術です」と言うことになる。コストだけではなく環境負荷の観点も入れておく必要がある。
- C：今年元日に能登半島地震がありもう少しで3カ月経つが復旧が極めて難航している。熊本地震では2カ月でほぼ調査が終わってほぼ復旧しているが今回は2カ月時点で国の報告だと50%しかいっていない。それはやはり半島ということもあり、道路がやられてしまい、隆起してるところがあるとか色々な困難があって皆さん頑張っているがなかなか進まない。都市水道はそれでもまだ色々やっているが山の中の小さな集落ではほとんど復旧ができていない状態。災害国であり、半島も沢山あることを考えると、あくまでも非常用かもしれないが大気造水という選択肢がこれからの日本において絶対ないとは言えないかもしれない。そういう技術を持っておく、検討しておくということも、今回の地震を改めて経験して感じた。

付録

付録1 開催趣旨・プログラム

開催趣旨

太陽電池材料や蓄電デバイス、エネルギーキャリア、分離技術の開発に見られるように、ナノテクノロジー・材料分野の科学技術の進展は環境・エネルギー分野の課題解決に対して重要な役割を果たし得ます。このようなナノテクノロジー・材料分野の貢献の可能性を横断的に俯瞰することは、環境・エネルギー分野の今後の研究開発の方向性を探るにあたり新たな視点やヒントをもたらすと期待できます。そこで今回、双方の分野の科学技術上の接点を見出し、新しい潮流や今後の研究開発の方向性について分野の枠を超えて議論を行うためのワークショップを開催することとしました。テーマには昨今改めて注目されている「水」を取り上げます。

水は人間社会の生存基盤としてあらゆる側面に関わります。国連の報告によれば、安全に管理された飲料水へのアクセスは年々改善されつつあるものの、未だ世界の約4分の1にあたる22億人が利用できていません（注1）。先進国においても飲料水中の有機フッ素化合物（PFAS）の問題など新たな混入物質問題が存在します。また水処理プロセスには多くのエネルギーが必要になるため、カーボンニュートラルの実現に向けたグリーン化が課題になっています。水電解による水素の製造にも、今後、原料としての水が世界的に必要なと考えられています。加えて近年は気候変動の影響によって10年に一度と言われるような極端な大雨や高温が頻度、強度ともに増加傾向にあります。これらによる深刻な風水害や干ばつが世界的に懸念されており、各地での水の確保や利用の様相はこれから大きく変わっていく可能性があります。

このように水利用の持続可能性には多数の課題が存在しています。そこで本ワークショップでは、水そのものや水の機能性をナノテクノロジー・材料の視点から深く理解し、より良く制御・利活用することができると、これらの課題の解決にどのような貢献があり得るかを俯瞰します。

なお本ワークショップでの議論は報告書としてとりまとめて公表する予定です。また議論を通じて得られた知見や視座等を基に、国として重点的に推進すべき研究開発課題群やその推進方策に関する提言等の作成検討にも活用させていただく予定です。

（注1）国連（2023）持続可能な開発目標（SDGs）報告書2023：特別版

プログラム

日時：令和6（2024）年3月27日（水） 13：00～18：30
形式：AP市ヶ谷会議室 6F Room Cとオンライン（Microsoft Teams）とのハイブリッド
主催：国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター（CRDS）
環境・エネルギーユニット、ナノテクノロジー・材料ユニット

13：00～13：05	開会挨拶	花村克悟（CRDS）
13：05～13：20	趣旨説明	中村亮二（CRDS）
13：20～13：50 （30分）	基調講演	滝沢智（東京大学大学院 工学系研究科附属水環境工学研究センター、 センター長・教授）
【セッション1：はかる】※計測・分析・モデリング		
13：50～14：40 （12分×4名）	フラッシュ トーク	芳村圭（東京大学生産技術研究所、教授） 栗栖太（東京大学大学院 工学系研究科附属水環境工学研究センター、教授） 鷲津仁志（兵庫県立大学大学院 情報科学研究科、教授） 塩見淳一郎（東京大学大学院 工学系研究科、教授）
14：40～15：00	質疑応答・議論	
【セッション2：わける】※分離・回収、除去・浄化		
15：10～16：00 （12分×4名）	フラッシュ トーク	手嶋勝弥（信州大学 先鋭材料研究所、教授） 足立泰久（筑波大学 生命環境学群、教授） 山下信義（産業技術総合研究所 環境計測技術研究グループ、上級主任研究員） 星野毅（量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー部門 ブランケット研究開発部増殖機能材料開発グループ、上席研究員）
16：00～16：20	質疑応答・議論	
【セッション3：つかう】※水の利用、水存在下での材料の利用・機能発揮		
16：30～17：10 （12分×3名）	フラッシュ トーク	花木保成（株式会社堀場製作所 エネルギー・環境本部、シニアマイスター） 寺坂宏一（慶應義塾大学 理工学部、教授） 森昌司（九州大学大学院 工学研究院、教授）
17：10～17：30	質疑応答・議論	
【セッション4：総合討論】		
17：30～18：30	総合討論	全体を通じた討議参加者： 古米弘明（中央大学 研究開発機構、機構教授）
18：30	閉会挨拶	魚崎浩平（CRDS）

付録

付録2 参加者一覧

(敬称略、所属・役職はワークショップ開催日時点のもの)

招聘有識者 (五十音順)

足立泰久	(筑波大学 生命環境学群、教授)
栗栖太	(東京大学大学院 工学系研究科付属水環境工学研究センター、教授)
塩見淳一郎	(東京大学大学院 工学系研究科、教授)
滝沢智	(東京大学大学院 工学系研究科付属水環境工学研究センター、センター長・教授)
手嶋勝弥	(信州大学 先鋭材料研究所、教授)
寺坂宏一	(慶應義塾大学 理工学部、教授)
花木保成	(株式会社堀場製作所 エネルギー・環境本部、シニアマイスター)
星野毅	(量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー部門 ブランケット研究開発部 増殖機能材料開発グループ 上席研究員)
森昌司	(九州大学大学院 工学研究院、教授)
山下信義	(産業技術総合研究所 環境計測技術研究グループ、上級主任研究員)
芳村圭	(東京大学生産技術研究所、教授)
鷲津仁志	(兵庫県立大学大学院 情報科学研究科、教授)
古米弘明	(中央大学 研究開発機構、機構教授)

CRDS環境・エネルギーユニット、ナノテクノロジー・材料ユニット

花村克悟	(環境・エネルギーユニット、上席フェロー)
魚崎浩平	(ナノテクノロジー・材料ユニット、上席フェロー)
中村亮二	(環境・エネルギーユニット、フェロー/ユニットリーダー)
高野暁巳	(環境・エネルギーユニット、フェロー)
鈴木康史	(環境・エネルギーユニット、フェロー)
鈴木和拓	(環境・エネルギーユニット、フェロー)
真崎仁詩	(環境・エネルギーユニット、フェロー)
坪井彩子	(環境・エネルギーユニット、フェロー)
尾山宏次	(環境・エネルギーユニット、フェロー)
関根泰	(環境・エネルギーユニット、フェロー)
徳永友花	(環境・エネルギーユニット、フェロー)
上野伸子	(連携担当/環境・エネルギーユニット、フェロー)
吉田修一郎	(環境・エネルギーユニット、特任フェロー)
眞子隆志	(ナノテクノロジー・材料ユニット、フェロー/ユニットリーダー)
福井弘行	(ナノテクノロジー・材料ユニット、フェロー)
沼澤修平	(ナノテクノロジー・材料ユニット、フェロー)
高村彩里	(ナノテクノロジー・材料ユニット、フェロー)
馬場寿夫	(ナノテクノロジー・材料ユニット、フェロー)
佐藤隆博	(ナノテクノロジー・材料ユニット、フェロー)
永野智己	(横断・融合グループ/ナノテクノロジー・材料ユニット、フェロー/総括ユニットリーダー/研究監)
曾根純一	(ナノテクノロジー・材料ユニット、特任フェロー)
魚見和久	(安全・安心グループ/ナノテクノロジー・材料ユニット、フェロー)

傍聴登録（ワークショップ開催日時点）

- 山崎恵理子（内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局、参事官補佐）
- 吉田貴紘（内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局、行政実務研修員）
- 栗辻康博（文部科学省 科学技術・学術政策局、国際情報分析官）
- 磯部敏宏（文部科学省 科学技術・学術政策局、技術参与）
- 山本弦（文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発戦略課、専門職）
- 半谷政毅（文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発戦略課、上席調査員）
- 小野山吾郎（文部科学省 科学技術・学術政策局 政策科学推進室、室長）
- 池上文香（文部科学省 研究開発局 海洋地球課）
- 田村嘉章（文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課、課長補佐）
- 後藤裕（文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課、課長補佐）
- 戸辺弘亮（文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課、総括係長）
- 宮澤淳次（文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課、専門職）
- 水野泉（文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課、係長）
- 中里貴司（文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課、調査員）
- 柴田鏡子（文部科学省 研究振興局 参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）付、参事官補佐）
- 水田剛（文部科学省 研究振興局 参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）付、専門職）
- 池田輝彦（株式会社堀場製作所 エネルギー環境本部 エネルギー環境戦略室、室長）
- 井上健太（株式会社堀場製作所 経営戦略本部 事業戦略室 経営戦略本部 事業戦略室 Field戦略チーム、チームリーダー）
- 宮村和宏（株式会社堀場製作所 開発本部 先端技術開発部 Core Sensing チーム）
- 勝又卓己（JST 国際部、副調査役）
- 佐伯浩治（JST、参与）
- 佐藤むつみ（CRDS、フェロー）
- 濱田志穂（CRDS、フェロー）
- 福井章人（CRDS、フェロー）
- 的場正憲（CRDS、フェロー）

環境・エネルギーユニット	花村 克悟	上席フェロー
	中村 亮二	フェロー・ユニットリーダー
	坪井 彩子	フェロー
	鈴木 康史	フェロー
	真崎 仁詩	フェロー
ナノテクノロジー・材料ユニット	魚崎 浩平	上席フェロー
	眞子 隆志	フェロー・ユニットリーダー
	福井 弘行	フェロー
	沼澤 修平	フェロー（～2024年3月）
	高村 彩里	フェロー
	馬場 寿夫	フェロー

俯瞰ワークショップ報告書

CRDS-FY2024-WR-02

環境・エネルギー分野におけるナノテク・材料の可能性 —水の利用—

令和 6 年 7 月 July 2024

ISBN 978-4-88890-927-3

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

なお、本報告書の参考文献としてインターネット上の情報が掲載されている場合には、本報告書の発行日の1ヶ月前の日付で入手しているものです。上記日付以降の情報の更新は行わないものとします。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

Please note that all web references in this report were last checked one month prior to publication.

CRDS is not responsible for any changes in content after this date.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



CRDS

<https://www.jst.go.jp/crds/>